

НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ УКРАЇНИ
«КИЇВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ
імені ІГОРЯ СІКОРСЬКОГО»
ФАКУЛЬТЕТ ЕЛЕКТРОНІКИ
КАФЕДРА ЕЛЕКТРОННИХ ПРИЛАДІВ ТА ПРИСТРОЇВ

«На правах рукопису»

УДК _____

«До захисту допущено»

Завідувач кафедри

_____ Писаренко Л.Д. _____

(підпис)

(ініціали, прізвище)

“ _____ ” _____ 2018 р.

Магістерська дисертація

Зі спеціальності (спеціалізації) 171 “Електроніка”

на тему: Оптоелектронний датчик рельєфу поверхні

Виконав: студент VI курсу, групи ДЕ-71мп

Михайлюк Олександр Денисович

(прізвище, ім'я, по батькові)

_____ (підпис)

Науковий керівник зав. каф. ЕПП проф. Писаренко Л. Д. _____

(посада, науковий ступінь, вчене звання, прізвище та ініціали)

_____ (підпис)

Консультант

_____ (назва розділу)

_____ (науковий ступінь, вчене звання, прізвище, ініціали)

_____ (підпис)

Нормоконтроль

(назва розділу)

_____ (науковий ступінь, вчене звання, прізвище, ініціали)

_____ (підпис)

Рецензент

_____ (посада, науковий ступінь, вчене звання, науковий ступінь, прізвище та ініціали)

_____ (підпис)

Засвідчую, що у цій магістерській дисертації немає
запозичень з праць інших авторів без відповідних посилань.

Студент _____

(підпис)

Київ – 2018 року

Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут
імені Ігоря Сікорського»
Факультет електроніки
Кафедра електронних приладів та пристроїв

Рівень вищої освіти – другий (магістерський) за освітньо-професійною (освітньо-науковою) програмою

Спеціальність (спеціалізація) 171 “Електроніка”
(код і назва)

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри

_____ Писаренко Л. Д.
(підпис) (ініціали, прізвище)

«__» _____ 2018р.

ЗАВДАННЯ
на магістерську дисертацію студенту
Михайлюку Олександрю Денисовичу
(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема дисертації Оптоелектронний датчик рельєфу поверхні
науковий керівник дисертації проф. Писаренко Леонід Дмитрович
(прізвище, ім'я, по батькові, науковий ступінь, вчене звання)

затверджені наказом по університету від «__» _____ 2018 р. № _____

2. Строк подання студентом дисертації _____

3. Об'єкт дослідження: Оптоелектронний датчик рельєфу поверхні

4. Предмет дослідження (Вихідні дані – для магістерської дисертації за освітньо-професійною програмою): Потужність лазерного діода- 500 мВт; Довжина випромінювальної хвилі – 650 нм;
; Числова апертура $n_2, n_3 - 1,5$; Діаметр лазерного пучка $d_3 = 2\text{мм}$; Ширина циліндричної лінзи
 $D_3 = 10\text{мм}$

5. Перелік завдань, які потрібно розробити:

Розглянутий один із методів безконтактного лазерного сканування:

Розрахувати відношення „сигнал/шум”:

Розрахувати відстані до об’єктів і виділення лазерної лінії:

Розробити план стартап-проекту для розробленого пристрою

6. Перелік графічного (ілюстративного) матеріалу _____

7. Дата видачі завдання 01.09.2018 р.

Календарний план

№ з/п	Назва етапів виконання магістерської дисертації	Строк виконання етапів магістерської дисертації	Примітка
1	Збір та вивчення джерел інформації для написання дипломної роботи; складання бібліографії наукових джерел	01-30.09.2018	
2	Складання плану дипломної роботи	1.10-06.10.2018	
3	Підготовка та написання першого Розділу	07-20.10.2018	
4	Підготовка та написання другого Розділу	21.10-03.11.2018	
5	Підготовка та написання третього Розділу	04-15.11.2018	
6	Написання анотації, вступу та Висновків	15-17.11.2018	
7	Виправлення зауважень	19-22.11.2018	
8	Оформлення дипломної роботи	23-29.11.2018	
9	Здача оформленої роботи на кафедрі	30.11.2018	
10	Захист дипломної роботи	17.12.2018	

Студент

(підпис)

(ініціали, прізвище)

Науковий керівник дисертації

(ініціали, прізвище)

(підпис)

**Пояснювальна записка
до магістерської дисертації**

на тему : Оптоелектронний датчик рельєфу поверхні

Київ – 2018

РЕФЕРАТ

Оптоелектронний датчик рельєфу поверхні

Магістерська робота освітньо-кваліфікаційного рівня «Спеціаліст» спеціальності 171- Електроніка, спеціалізація – Електронні прилади та пристрої. **Михайлюк Олександр Денисович**. КПІ ім. Ігоря Сікорського. Факультет електроніки, кафедра «Електронні прилади та пристрої». Група ДЕ-71мп. – К.: КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2018. – ст.72, іл.26 , табл.1 .

Ключові слова: Датчик рельєфу поверхні; Методи вимірювання; Лазерний діод; Далекоміри.

Короткий зміст роботи: В магістерській роботі представлено огляд науково-технічної літератури по методам вимірювання лінійних розмірів та відстаней.

Зроблено аналіз елементів конструкції оптоелектронного датчика, огляд цифрової камери, її параметри та характеристики датчиків зображення. Лазерний діод, принцип дії, технологія, параметри. Розглянута структурна схема датчика рельєфу.

Приведено розрахунки відношення „сигнал/шум” на виході елемента матричного фотоприймача та розрахунки відстані до об’єктів і виділення лазерної лінії.

Розроблена структурна схема матричного фотоприймача згідно позначень оптичної схеми, яка має наступні параметри:

- Потужність лазерного діода 500 мВт.
- Довжина хвилі лазерного діода 650 нм.
- Діаметр лазерного пучка 2 мм.
- Ширина циліндричної лінзи 10 мм.
- Довжина лазерної лінії 10 м.
- Кут падіння лазерного випромінювання 45°.
- Числова апертура 1,5.

- Діаметр вхідної апертури телеоб'єктива 70 мм.

АНОТАЦІЯ

Дана робота присвячена аналізу та принципу роботи датчика рельєфу поверхні.

Оптоелектронний датчик надає можливість систему технічного зору, яка може використовуватись у технологіях тривимірного сканування ґрунтовані на безконтактному принципі. На даний час найбільш досконалими є пристрої на основі безконтактного сканування. Вони дають переваги при обчисленні об'єктів із м'яких матеріалів при збереженні швидкості сканування.

В роботі представлено огляд науково-технічної літератури з техніки конструювання.

Розглянуто методи безконтактного лазерного сканування для отримання даних про поверхню. Безконтактному метод дозволяє швидко і якісно, в порівнянні з контактними методами сканування, без механічного контакту приладу з об'єктом, отримувати просторову математичну модель для подальшого використання, що залежить від типу задачі. Чутливість даних пристроїв легко збільшується за рахунок використання фотооб'єктивів з більшою фокусною відстанню.

SUMMARY

This work is devoted to the analysis and principle of the surface relief sensor.

Optoelectronic sensor provides the possibility of a system of technical vision, which can be used in three-dimensional scanning technologies based on the contactless principle. At present, the most advanced devices are non-contact scanning devices. They give preference to computed objects from soft materials while maintaining scan speeds.

The paper presents an overview of the scientific and technical literature on engineering design.

Methods of contactless laser scanning are used to obtain surface data. The noncontact method allows quickly and qualitatively, in comparison with contact methods of scanning, without mechanical contact of the device with the object, to obtain a spatial mathematical model for future use, which depends on the type of task. The sensitivity of these devices is easily increased by the use of lenses with a greater focal length.

ЗМІСТ

ПЕРЕЛІК ПОЗНАЧЕНЬ ТА СКОРОЧЕНЬ	9
ВСТУП.....	10
1. Огляд методів вимірювання лінійних розмірів та відстаней	11
1.1. Триангуляційний метод.....	Ошибка! Закладка не определена.
1.2. Фазовий метод.....	18
1.3. Часовий метод	23
1.4. Метод на основі лідару.....	30
2. АНАЛІЗ ЕЛЕМЕНТІВ КОНСТРУКЦІЇ ОПТОЕЛЕКТРОННОГО ДАТЧИКА.....	Ошибка! Закладка не определена.
2.1. Цифрова камера	33
2.2. Лазерний діод, принцип дії, технологія, параметри	43
2.3. Схема датчика рельєфу	53
3. РОЗРАХУНКОВА ЧАСТИНА.....	55
3.1. Розрахунок відношення «сигнал/шум»	57
3.2. Розрахунок відстані до об'єктів і виділення лазерної лінії.....	62
4. ПРОПОЗИЦІЇ ДО СТАРТАП-ПРОЕКТУ.....	68
ВИСНОВКИ	Ошибка! Закладка не определена.
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ	
ДЖЕРЕЛ.....	Ошибка! Закладка не определена.

ПЕРЕЛІК ПОЗНАЧЕНЬ ТА СКОРОЧЕНЬ

АЦП – Аналого-цифровий перетворювач

КМОП - Комплементарна метал-оксид-напівпровідникова технологія

ПЗЗ – Прилад із зарядовим зв'язком

ЛФП – Лінійний фоточутливий прилад

ЛД – Лазерний діод

МОС ГФЕ – Газофазна епітаксія металоорганічних сполук

ПГС – Подвійна гетероструктура

ВСТУП

В останнє десятиліття в промисловості розвинених держав все більшого застосування знаходять прилади для визначення розмірів об'єктів складної геометричної форми. Області їх застосування дуже широкі – від медицини (антропология, протезування, ортопедія та інше) до авіа-, авто-, кораблебудування. Найбільший інтерес представляють прилади, в яких застосовані оптичні принципи визначення відстані, де немає механічного контакту вимірювального приладу з вимірювальним об'єктом.

Останнім часом, сканування здійснювалось з використанням пристроїв, використовуючих різні апаратні методи створення об'ємних образів . Це свідчить про те, що незважаючи на велику кількість розробок в цій області, жодна із технологій не стала індустріальним стандартом, і навряд чи стане такою в найближчому майбутньому. Це механічні сканери і механічні датчики, основані на контактному принципі, а також триангуляційні датчики і інтерферометри, основані на безконтактному принципі. Технологія безконтактного сканування постійно розвивається і удосконалюється. Пристрої на основі безконтактного сканування дають переваги при обчисленні об'єктів із м'яких матеріалів при збереженні швидкості сканування.

1.ОГЛЯД МЕТОДІВ ВИМІРЮВАННЯ ЛІНІЙНИХ РОЗМІРІВ ТА ВІДСТАНЕЙ

Методи вимірювання лінійних розмірів об'єктів, вимірювання великих відстаней з високою точністю безконтактними способами займають центральне місце в науці і техніці. Прогрес не стоїть на місці - системи технічного зору, електронно-оптичних комплекси успішно працюють у багатьох областях.

Для вимірювання великих відстаней використовують далекоміри. В цілому їх широко використовуються в багатьох галузях: геодезія для вимірювань великих відстаней; для наведення на різкість, в фотографії; для наведення на ціль в військовій справі; для вимірювання розміру лінійної деформації в приладобудуванні та машинобудуванні; при будівництві будівель і споруд.[2]

За принципом дії всі далекоміри поділені на активні і пасивні. До активних відносяться: звукові, лазерні і світлові. До пасивних далекоміри: далекоміри, використовують оптичний паралакс, (наприклад далекомірний фотоапарат) і далекоміри, що використовують зіставлення об'єкта будь-якого зразком.

1.1 Тріангуляційний метод

Тріангуляційний (або параллаксний) метод вимірювання реалізується раціонально для цілого ряду застосувань з достатніми показниками по точності і дальності.

Тріангуляція полягає у визначенні просторового розташування спеціально закріплених на місцевості геодезичних пунктів в вершинах цілого ряду трикутників. Спочатку, з високим ступенем точності визначають азимути вихідних напрямків ab , ba , mn , nm (рис.1.1) Тріангуляційний ряд трикутників по меридіану. Наступним етапом буде визначення астрономічних координат (широти і довготи) в пунктах вимірювань азимутів двох вихідних базисів. У кожній парі жорстких сторін (ab , mn) координати вимірюються тільки в одній точці, наприклад a , m (рис.1.1). При цьому слід звернути особливу увагу на визначення астрономічних широт в ряду трикутників, розташованих у напрямку меридіанів. При вимірах в трикутниках, сформованих уздовж паралелей, необхідно оприділити належну увагу визначенню астрономічних довгот. Далі проводять вимірювання довжин двох базисних сторін (ab , mn). Ці сторони мають порівняно невеликі довжини (близько 8-10 км). Тому їх вимірювання більш економічні і точні щодо сторін cd , tq , складових відстані від 30 до 40 км. В наступну чергу виконується перехід від базисів ab , mn через кутові вимірювання в ромбах $abcd$ і $mntq$ до сторін cd , tq . А потім послідовно практично в кожній вершині трикутників cde , def , efg і інших вимірюються горизонтальні кути до примикання до наступної основної сторони tq всього ряду трикутників. Через виміряні кути трикутника з виміряної базисної або обчисленої основною стороною послідовно обчислюються всі інші сторони, їх азимути і координати вершин трикутників.

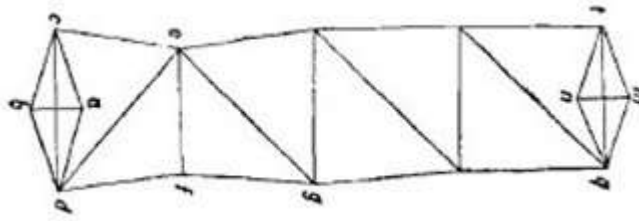


Рис.1.1. Триангуляційний ряд трикутників по меридіану.

Далекомір складається з лазерного модуля (1) і светосильного об'єктива (2), в фокальній площині якого встановлено лінійний фоточутливий прилад (ЛФП) (3) Рис.1.2.

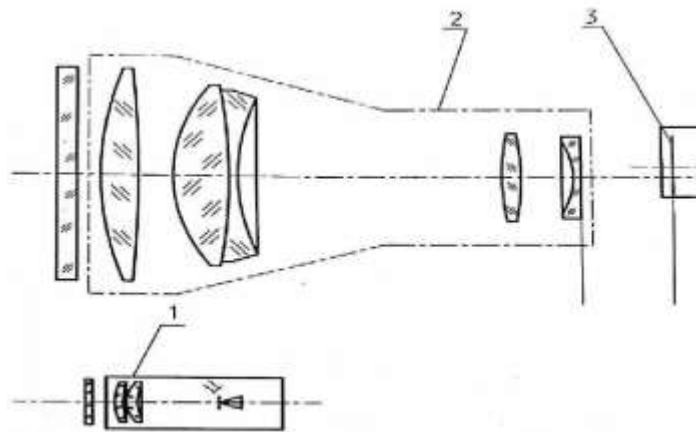


Рис.1.2. Склад далекоміру.[1]

Далекомір на основі методу триангуляції працює наступним чином. Лазерний модуль формує оптичну пляму на предмет, до якого вимірюється дальність. Об'єктив (діаметр 50 мм) формує на ЛФП (формат 1024 елементу) зображення цієї плями, положення якого в межах лінійки елементів залежить від вимірюваної дальності. Юстирування оптичних осей показана на (Рис. 1.3)

Так як оптичні осі лазерного пучка і далекоміра паралельні і зміщені один щодо одного на постійне відстань, то зображення плями на ЛФП зміщене щодо оптичної осі об'єктива, і величина цього зсуву залежить від вимірюваної дальності до предмета. Зсув ЛФП щодо оптичної осі приймального об'єктива визначає робочий діапазон вимірювань по дальності.

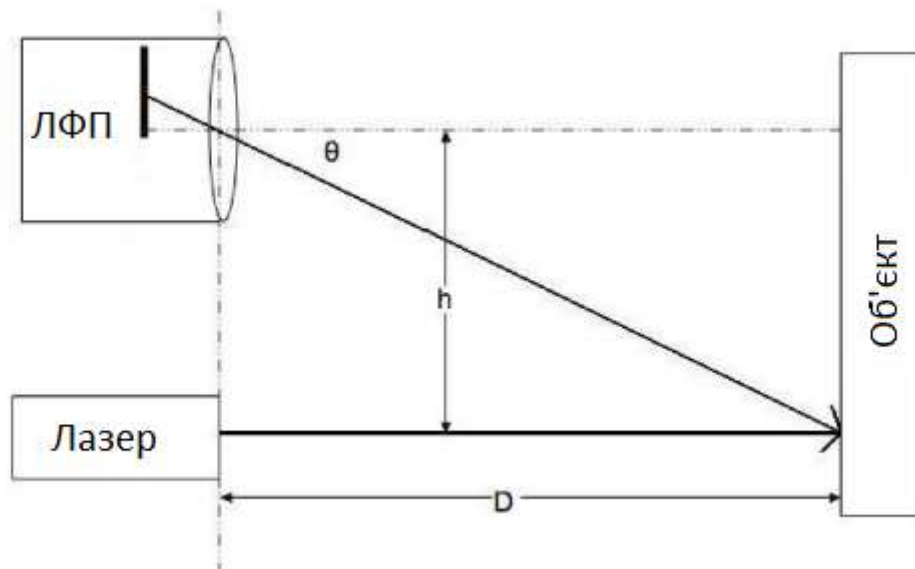


Рис.1.3. Принцип вимірювання відстані.

Так як при зміні відстані до екрану змінюється положення площини зображення щодо фокальної площини об'єктива, то змінюється і розмір плями на ЛФП, тому відлік положення плями ведеться по розташуванню його центра ваги. Структурна схема лазерного далекоміра (ЛД) показана на рис. 1.4.

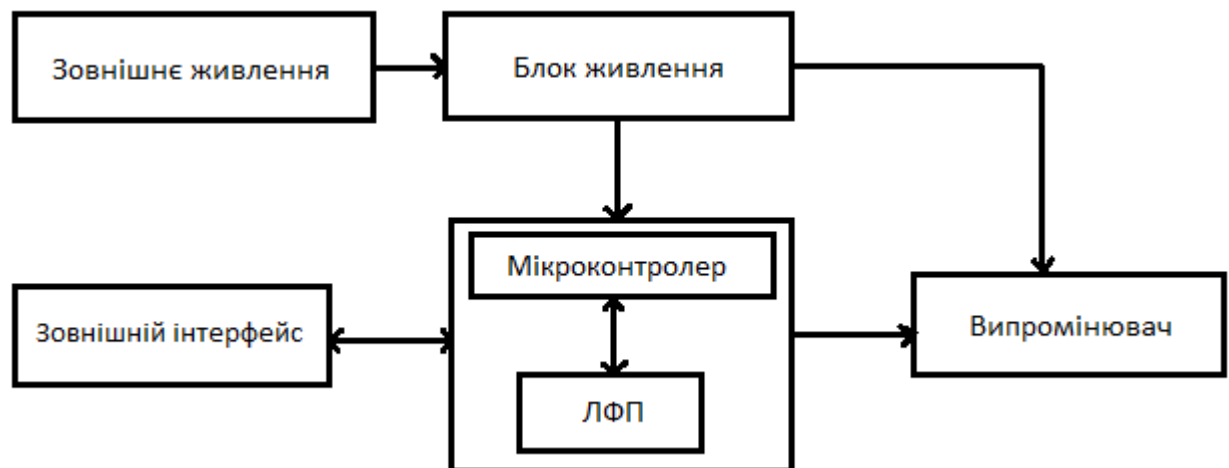


Рис.1.4. Структурна схема лазерного тріангуляції іонного далекоміра

Після приходу команди на запуск, контролер запускає випромінювач і починає процес вимірювання. Оптичне випромінювання, відбите від об'єкта, надходить на ОФП, після чого мікроконтролер обробляє з нього сигнали, обчислює координати центру ваги плями, робить необхідні обчислення і

перетворення, і передає відповідне значення дальності на зовнішнє пристрій.
В результаті проведеної роботи було розроблено лазерний далекомір на основі тріангуляційного методу вимірювання.

Основні параметри ЛД наведені в таблиці.

Параметри ЛД

Найменування параметра, характеристика	Значення параметру
Діапазон вимірювання, м	1...12
Час готовності до роботи, хв.	<0.5
Похибка вимірювання, не більше, мм	±10
Обмін інформацією, тип інтерфейсу	RS-422
Діапазон робочих температур, ° С	-60 ... +60
Напруга живлення, В	4...12

Елюри напруг сигналів на виході ЛФП наведені на рис.1.5.

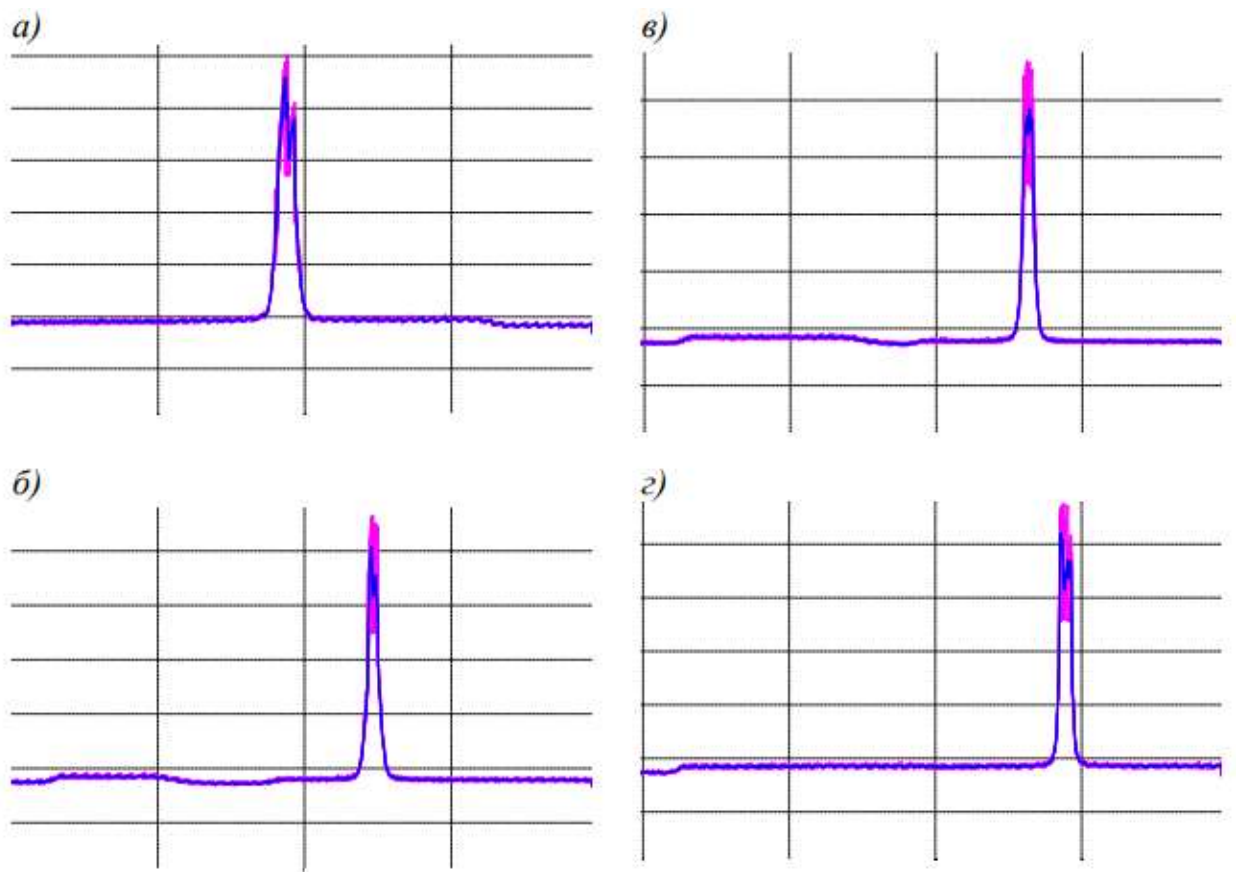


Рис. 1.5. Епюри напруг сигналів на виході ЛФП:

а) 3.75 м; б) 5.82 м; в) 6,76 м; г) 9.08 м

Переваги тріангуляції

У розвитку геодезичної науки та її практичного застосування очевидні переваги тріангуляційного способу вимірювань. За допомогою цього універсального методу можливо:

- визначення положення геодезичних точок на значно віддалених відстанях;
- виконання основних робіт з будівництва геодезичних мереж на всій території країни;
- забезпечення основою всіх топографічних зйомок;
- вибудовування через основні геодезичні роботи різних систем координат;

- виробництво інженерних і дослідницьких робіт;
- періодичне визначення розмірів Землі;
- вивчення переміщень земної поверхні.

Лазерний далекомір подвійного призначення, що використовує триангуляційний метод вимірювання відстані, працює з великою точністю при мінімальних габаритних розмірах.

1.2. Фазовий метод

Фазовий метод вимірювання вимагає того, щоб передавач віддалеміра, безперервно випромінював вздовж лінії гармонічні коливання. Гармонічні коливання це група періодичних коливань, які описуються рівняннями

$$x = A \cdot \cos(2\pi ft + \varphi_0) \text{ , або } x = A \cdot \sin(2\pi ft + \varphi'_0) \text{ ,}$$

де A – амплітуда гармонічного коливання, а аргумент косинуса або синуса – його поточна фаза, яка є лінійною функцією часу і визначає стан гармонічно змінюваної величини в момент часу t . Фаза вимірюється в кутових величинах. Величини φ_0 і φ'_0 називають початковими фазами. Їх значення обумовлене вибором початку відліку часу. Фаза коливань є пропорційною до частоти коливань. Частота f – це кількість циклів коливань, які здійснюються за одну секунду. Частота коливань є обернено пропорційною до періоду коливання: $T = 1/f$. Період – це час, за який здійснюється один повний цикл коливання. Відрізок, на який розповсюдиться хвиля за час рівний одному періодові, називають довжиною хвилі коливання $\lambda = v \cdot T = v/f$.[4]

Коливання, які випромінює передавач, проходять вимірювану лінію, відбиваються, другий раз проходять лінію і приймаються приймачем. Коливання з приймача та частина коливань, що випромінює передавач, тобто прямі та відбиті коливання, ідуть на вимірювальний пристрій, роль якого в фазовому методі виконує фазометр. Він вимірює різницю фаз коливань, які потрапляють на нього.[4]

Знайдемо залежність між вимірюваною різницею фаз та довжиною лінії S . Для цього запишемо рівняння фаз коливань, які ідуть на фазометр в момент часу t . Фаза прямих коливань, які випромінює передавач,

$$\varphi_n = 2\pi ft + \varphi_0 \text{ ,}$$

де f – частота випромінюваних коливань, або вимірювальна частота, а φ_0 – їх початкова фаза. В цей же момент часу на фазометр ідуть коливання з приймача. Вони випромінювались передавачем раніше на проміжок часу $\tau = 2 \cdot S/v$. Тому їх фаза

$$\varphi_s = 2\pi f(t - \tau) + \varphi_0.$$

Різниця фаз прямих і відбитих коливань

$$\Delta\varphi = \varphi_n - \varphi_s = 2\pi f\tau. \quad (1)$$

Як бачимо, різниця фаз пропорційна до часу τ та вимірювальної частоти. Виразимо в (2) час τ через S з (1) і визначимо довжину вимірюваної лінії

$$S = \frac{\Delta\varphi}{2\pi} \cdot \frac{v}{2f}. \quad (2)[4]$$

Отриманий вираз називають **основною формулою фазового методу**.

Із (2) бачимо, що для визначення довжини лінії фазовим методом необхідно виміряти різницю фаз та знати їх частоту і швидкість розповсюдження в повітрі.[4]

Виміряна різниця фаз містить помилку $m_{\Delta\varphi}$. В зв'язку з цим ми обчислимо згідно з (2) довжину лінії теж з помилкою $M_{\Delta\varphi}$, яку можна визначити за формулою

$$M_{\Delta\varphi} = \frac{m_{\Delta\varphi}}{2\pi} \cdot \frac{v}{2f}.$$

Вплив помилки вимірювання різниці фаз на точність визначення S згідно (2) не залежить від довжини лінії, а тільки від частоти, або від половини довжини хвилі вимірювальної частоти. Для зменшення

впливу помилки вимірювання різниці фаз на точність визначення довжини лінії потрібно збільшувати частоту.[4]

Фазометри, які використовують у віддалемірах, дозволяють одержати довжини ліній з достатньою для геодезистів точністю при вимірювальних частотах не менших від 10 МГц, тому такі вимірювальні частоти використовують у фазових віддалемірах.[4]

Коливання з частотою порядку 10 МГц розповсюджуються в атмосфері непрямолінійно. Тому у віддалемірах вимірювальні частоти переносяться вздовж вимірюваних ліній на надвисокочастотних несучих коливаннях, траєкторію яких в атмосфері можна вважати прямолінійною. У великій групі віддалемірів несучими коливаннями є коливання оптичного діапазону, частота яких є більшою від 1000 ГГц. Ці прилади називають світловіддалемірами. Є група віддалемірів, в яких використовують ультракороткохвильові несучі коливання, частота яких змінюється від 3 до 30 ГГц. Їх прийнято називати радіовіддалемірами. Вимірювальні коливання модулюють частоту, амплітуду, або інший параметр несучих коливань. Нагадаємо, що модуляцією називають закономірну зміну будь-якого параметра коливань. Частота коливань, які модулюють, повинна бути в багато разів меншою від частоти несучих коливань.[4]

Формулу можна записати так

$$S = \frac{\Delta\varphi}{2\pi} \cdot \frac{\lambda}{2} \quad (3)$$

де $\frac{\lambda}{2}$ – півдовжина хвилі коливання вимірювальної частоти. При такій формі запису видно, що півдовжина хвилі вимірювальної частоти є своєрідною одиницею міри довжини лінії, бо саме з нею порівнюють довжину вимірюваної лінії.[4]

Коефіцієнт $\Delta\varphi/2\pi$ показує, скільки разів півдовжина хвилі вклалася у вимірюваній лінії, або в скільки разів довжина лінії є більшою від $\lambda/2$. При $f = 10$ МГц півдовжина хвилі дорівнює 15 м. Лінії, які вимірюють віддалеміром ϵ , як правило, більшими від 15 м. Вони можуть містити в собі десятки, сотні і навіть тисячі 15-метрових відрізків. Отже різниця фаз теж містить в собі десятки, сотні, а навіть тисячі цілих періодів. Тому можна записати

$$\Delta\varphi = (N + \delta) \cdot 2\pi, \quad (4)$$

де N – ціле число, δ – дробова частина періоду, яку називають **фазовим доміром**. Підставимо (4) в (3) і отримаємо

$$S = (N + \delta) \cdot \frac{\lambda}{2} = N \cdot \frac{\lambda}{2} + l \quad (5)$$

Тут $l = \delta \cdot \lambda/2$. Цю величину називають **лінійним доміром**. Це є залишок, отриманий після того, як в лінії помістити ціле число N півдовжин хвиль вимірювальної частоти. Очевидно, що завжди $l < \lambda/2$ коливань тої частоти, на якій виміряний фазовий домір.[4]

Фазометри віддалемірів дозволяють вимірювати різницю фаз тільки в межах одного періоду, тобто вони вимірюють тільки фазовий домір. Ціле число N фазометри не визначають. Коли змінити довжину лінії на півдовжину хвилі, то різниця фаз зміниться на один період, а показ фазометра залишиться без змін. Це є причиною того, що, провівши вимірювання різниці фаз на одній частоті, ми маємо багатозначність. Це великий недолік фазового методу. Для виключення багатозначності потрібно виконати вимірювання на двох, або більше вимірювальних частотах.[4]

Якщо довжина вимірюваної лінії є меншою від $\lambda/2$, то фазовий віддалемір вимірює її однозначно.

Незважаючи на цей недолік, фазовий метод знайшов дуже широке застосування. Він використовується практично у всіх світло- і радіовіддалемірах, а також в радіогеодезичних і супутникових системах.[4]

Фазометри мають шкалу, з якої під час вимірювань знімають відліки. Вони є фазовими домірами в поділках шкали. Щоб отримати фазовий домір в частинах періоду, що необхідно для обчислень довжин ліній за (5), потрібно зчитаний з фазометра відлік a поділити на ціну всієї шкали фазометра $A_{\text{шк}}$: $\delta = a / A_{\text{шк}}$. [4]

Існує різновидність фазового методу, в якій вимірювальними коливаннями є самі електромагнітні коливання оптичного діапазону. Тому їх не модулюють. Цей метод вимірювань названо **інтерференційним**.

1.3 Часовий метод

При цьому методі передавач випромінює імпульси електромагнітних коливань. Тому його нерідко називають імпульсним. Невелику частину кожного імпульсу, випромінюваного передавачем в напрямі відбивача, подають на вимірювальний пристрій. Цю частину називаємо прямими, або опорними імпульсами. Основна частина імпульсів проходить два рази вимірювану лінію: від передавача до відбивача і від відбивача до приймача, який їх приймає і передає на вимірювальний пристрій.[17]

Вимірювальний пристрій визначає час τ запізнення приходу на нього відбитих імпульсів відносно прямих. Визначивши час τ , обчислюють за

довжину вимірюваної лінії $S = \frac{d}{2} = \frac{v \cdot \tau}{2}$ (1). Ця формула є основною формулою часового методу.[18]

Нерідко визначення часу τ виконують за допомогою електронно-променевої трубки, на лінійній або круговій розгортці якої отримують помітки під впливом прямих і відбитих імпульсів. Період розгортки $T_{роз}$ є завжди більшим від часу, який потрібний хвилям на проходження подвійної вимірюваної лінії максимальної довжини, тобто $T_{роз} > \tau_{max}$. За віддалю між цими помітками визначають час запізнення відбитих імпульсів відносно прямих.[18]

Похибка m_τ у визначенні часу τ приводить до похибки M_τ довжини лінії, обчисленої за (1). З цієї формули випливає, що

$$M_\tau = \frac{v \cdot m_\tau}{2} \quad (2)$$

В польових умовах час τ визначають з точністю 10 нс. Згідно (2) ця помилка визначення часу дасть помилку в довжині лінії 1.5 м, що обмежує застосування імпульсних віддалемірів в геодезії. Вказана точність може задовільнити геодезистів тільки при вимірюванні ліній, не коротших 100 км.

До переваг часового методу треба віднести велику потужність у випромінюваному імпульсі при порівняно низькій потужності живлення віддалеміра. Тому при однаковій потужності живлення радіус дії імпульсного віддалеміра є завжди більшим від віддалеміра з безперервним випромінюванням. Значна потужність імпульсу дозволяє при вимірюванні порівняно коротких ліній працювати без відбивача, тобто використовувати імпульс, відбитий тим об'єктом, до якого визначають віддаль. Так працюють радіовисотоміри, приймач яких приймає імпульси, відбиті від поверхні землі.[18]

Імпульсні віддалеміри знайшли застосування при визначеннях віддалей до Місяця. В них джерелом короткочасних імпульсів електромагнітних коливань є рубінові лазери, а проміжки часу τ визначають стаціонарними високоточними методами з точністю порядку 1 нс, що відповідає віддалі 15 см.[17]

1.4 Інтерференційний метод

Інтерференційний спосіб вимірювання відстаней (довжини) включає просвічування збирає лінзи когерентними зустрічними пучками з плоскими хвильовими фронтами, спрямування цих пучків по одній оптичній осі в площину спостереження і порівняння на основі інтерференції амплітудно-фазових характеристик цих двох пучків. При просвічуванні збирає лінзи плоскі хвильові фронти перетворюються в сферичні, і при переміщенні лінзи вздовж оптичної осі кривизна хвильових фронтів і їх інтерференція в площині спостереження змінюються в обраній для вимірювання їх відстані (довжини) точці площині спостереження у вигляді числа і частоти смуг. Пристрій вимірювання відстаней (довжини) містить лазер, розташований по ходу випромінювання телескопічну систему, расщепитель лазерного пучка, плоскі дзеркала, розташовані під кутом до випромінювання лазера, площину спостереження інтерференційної картини, між плоскими дзеркалами на оптичній осі введена збирає лінза, забезпечена механізмом переміщення, а в площині спостереження розташовується на певній відстані від оптичної осі приймач оптичного випромінювання. Технічний результат - підвищення точності вимірювань довжини в поєднанні з високою завадостійкістю і малою чутливістю до змін навколишнього середовища.

Універсальний інтерферометр. Цей прилад призначений для абсолютних вимірювань кінцевих мір довжиною до 1000 мм і геодезичних жезлів завдовжки до 1200 мм. Оптична схема інтерферометра дана на рис. 6. Білий світло від лампи розжарювання висвітлює отвір в діафрагмі 1, вміщений в фокальній площині об'єктива 2. Паралельний пучок променів проходить через трубчастий (нерегульований) еталон Фабрі і Перо 3 і прямує дзеркалом 5 на розділову пристрій, що складається з дзеркал 6 і 8 і двох пластин 7 з напівпрозорим шаром на одній з поверхонь. Поділу-лені пучки променів, відбиваючись від дзеркал 8 і 6, йдуть паралельно один одному, що підвищує стійкість інтерферометра до зміни температури. Це пристрій діє аналогічно

призмі Кестерса, але значно простіше її у виготовленні.[4]

Пучок променів, відбитий від дзеркала 8, падає на рухоме дзеркало 9, йде назад по колишньому напрямку і, відбившись від напівпрозорої поверхні пластини 7, направляється дзеркалом 12 в зорову трубу, складену з об'єктива 13 і окуляра 14. Інший пучок променів, відбитий від дзеркала 6, падає частково на вільну поверхню вимірюваної кінцевої заводи 10, а частково - на пластину 11, притерту до протилежної поверхні заводи. На зворотному шляху цей пучок проходить через пластину 7 і йде по одному напрямку з першим пучком.[4]

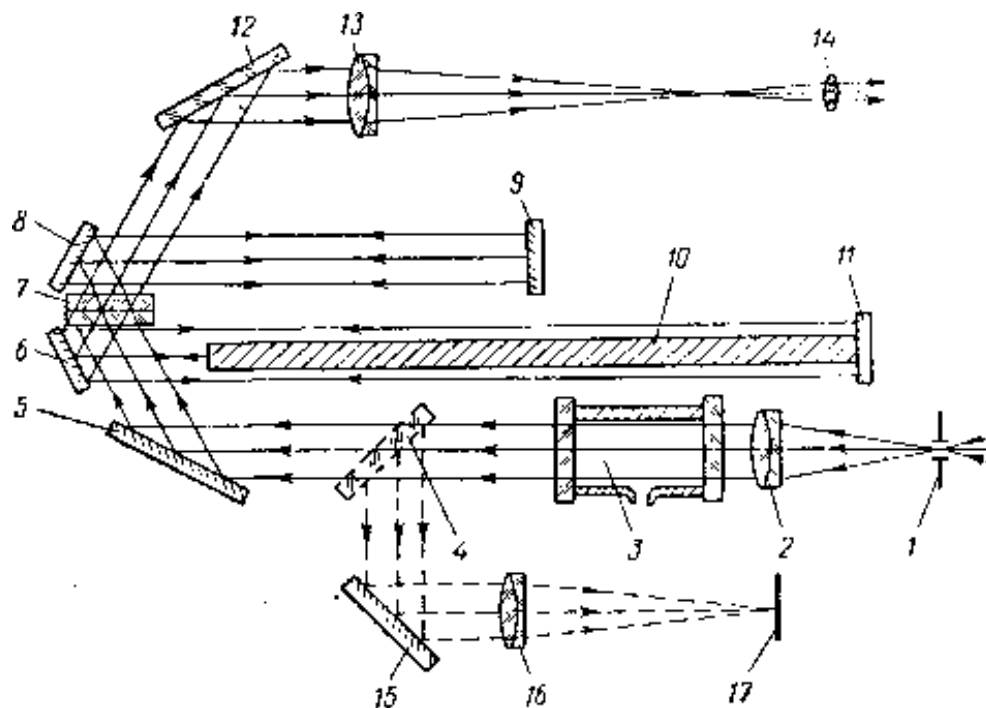


Рис.1.6. Універсальний інтерферометр для вимірювання довжин.[4]

Інтерференційна картина на поверхнях заводи 10 і пластини 11 видно при такому положенні дзеркала 9, при якому довжина шляху променів від пластини 7 до дзеркала 9 відрізняється від шляху між пластиною 7 і поверхнею заводи 10, а також між пластинами 7 і 11, на величину, кратну довжині зразка 3. При цьому промені, що пройшли в інтерферометрі менший шлях, але випробували кілька відображень всередині зразка, інтерферируют з нульовою різницею ходу з променями, які пройшли еталон без відображень,

але зате виконали більший шлях в інтерферометрі.[4]

В універсальному інтерферометрі використовується еталон довжиною 100 мм. З його допомогою можна атестувати кінцеві міри з довжинами, кратними 100 мм. Так, якщо довжина заходи дорівнює 1000 мм, то дзеркало 9 встановлюють так, щоб воно ділило яку навпіл. При цьому як на вільній поверхні заходи, так і на поверхні пластини 11 з нульовою різницею ходу інтерферують промені, що випробували в ідеалі по 10 відображень.[4]

Мікрометренним переміщенням дзеркала 9 поєднують чорну ахроматичну смугу на поверхні заходи 10 з ниткою окуляра. Якщо довжина заходи точно дорівнює довжині зразка, помноженої на ціле число, то чорна ахроматична смуга на поверхні пластини 11 виявляється при цьому також суміщеною з ниткою окуляра. Зсув смуги показує, що має місце відступ від цього рівності. Вимірявши зміщення ахроматической смуги на поверхні пластини 11, обчислюють довжину L заходи по формулі: $L=kl+\varepsilon\lambda/2$, де l - довжина еталона; k - ціле число, яке дорівнює відношенню номінальної довжини заходи до довжини зразка, а ε - зміщення ахроматической смуги, виражене в частках ширини смуги. Величину ε вимірюють, поєднуючи смугу з ниткою окуляра невеликою зміною тиску всередині зразка. Зміна тиску визначають за шкалою мікроманометра, проградуїрованою безпосередньо в значеннях вимірюваної різниці ходу. Похибка вимірювання довжини заходи 10 значною мірою залежить від точності визначення довжини еталона 3. Довжину еталона вимірюють після установки його в корпусі інтерферометра. Для цього за допомогою монохроматора послідовно висвітлюють діафрагму 1 світлом монохроматичних випромінювань декількох довжин хвиль. Вимикаюче дзеркало 4, встановлене на шляху променів виходять з еталона, разом з дзеркалом 15 направляє світло в фотокамеру, яка містить об'єктив 16 і фотоплівку 17. Фотографуючи кільця рівного нахилу і вимірюючи їх діаметри, обчислюють дробові частини порядків інтерференції ε для кількох довжин хвиль і методом збігу дрібних частин знаходять ціле число порядків інтерференції для обраної довжини хвилі і тим самим визначають довжину

зразка. У модифікованій моделі того ж інтерферометра дробові числа 8 вимірюють фотоелектричним методом. Для цього в площині 17 поміщають діафрагму з круглим отвором, яке вирізає невелику частину q центральної плями в інтерференційній картині рівного нахилу. За діафрагмою встановлюють фотоумножувач, сигнали якого записуються на стрічці самописця. За допомогою двигуна, що переміщує поршень насоса, тиск повітря всередині зразка періодично змінюють на 2-3 порядки інтерференції в кожную сторону від атмосферного тиску. Отримавши на стрічці кілька максимумів і зробивши на ній відмітку, що відповідає атмосферному тиску p , обчислюють ε за формулою: $\varepsilon = (p - p_1) / (p_2 - p_1)$, де p_1 та p_2 – тиск, відповідний двом сусіднім максимумів, причому $p_1 < p < p_2$. У виміряне значення ε вносять поправку $d\varepsilon$, що залежить від довжини зразка і діаметра отвору в діафрагмі. Розрахунок дає, що $d\varepsilon = q/2$. Похибка визначення ε фотоелектричним методом становить 0,005 порядку інтерференції. Застосування методу скорочує час вимірювання і підвищує його надійність.[4]

Для вимірювання на інтерферометрі довжини міри, не кратною 100 мм, до неї притирають додаткову міру 1-го розряду так, щоб складений блок мав довжину, кратну 100 мм.

Всі основні деталі інтерферометра укріплені на масивній станині, яка поміщена всередині місцевого термостата, що має форму порожнього циліндра діаметром 350 мм і довжиною 1400 мм. Між внутрішньою і середньою стінками термостата є герметична камера, через яку можна пропускати воду з ультратермостат для підтримки постійної температури всередині циліндра. Простір між середньою та зовнішньою стінками термостата, так само як і між стінками його торцевих кришок, заповнений теплоізоляційним матеріалом - скляній ватою. Через 6-8 год після включення ультратермостат інтерферометр приходить в температурну рівновагу, і температура в приладі підтримується постійної (зі швидкістю зміни не більше $0,05^\circ \text{ Св1ч}$). Інтерферометр може працювати в приміщенні, що не має спеціальних термостатних пристроїв.[4]

Дослідження інтерферометра показало, що середня квадратична похибка з десяти вимірів довжини еталона, приведеної до 20°C , становить 0,006-0,008 мкм. Середня квадратична похибка ряду вимірювань кінцевої міри 1000 мм, а також кварцового жезла довжиною 1200 мм не перевищує 0,1 мкм.

1.5. Метод на основі лідару

Перспектива розвитку сучасної лазерної локації пов'язана зі створенням високоінформативних локаційних систем, що забезпечують рішення ряду актуальних завдань, які засобами, радіолокацій, і оптичними пасивними тепло- і телевізійними системами вирішені бути не можуть. До проблемних завдань локації можна віднести високоточні трикоординатні вимірювання, реєстрацію об'ємного зображення об'єктів, завдання селекції і ідентифікації цілей.

Відбитий від поверхні об'єкту лазерний сигнал має просторово-часову структуру і містить, окрім трикоординатної інформації, дані про тривимірну форму і відбивних властивостей об'єкту. Відобразити весь об'єм інформації, поміщеної в лазерному сигналі, дозволяє новий клас тривимірних приймачів лазерного випромінювання, що володіють просторово-часовою роздільною здатністю, у яких як первинний перетворювач зображення використовується багатоелементний детектор «миттєвої» дії, що має незалежні виходи зі всіх елементів матриці [10]. Принцип дії ладару зображено на рис.1.7. Завдяки високій швидкодії форма сигналу в елементах матриці перетворюється без спотворення, що є необхідною умовою роботи високоточних часовимірювальних систем.

При ширококутовому зондуванні сцени часова затримка відбитого від об'єкту сигналу, виміряна в кожному елементі матриці, однозначно пов'язана з подовжньою характеристикою тривимірного об'єкту - його глибиною. Кутова роздільна здатність лазерного локатора визначається розміром матриці. Таким чином, тривимірний приймач лазерного випромінювання дозволяє реалізувати метод лазерної стереометрії - прямий метод вимірювання в полярних координатах (кут-кут-дальність) тривимірної форми об'єкту спостереження. При цьому якість тривимірного зображення об'єкту, на відміну від тепло- і

телевізійних приймачів, не залежить від величини контрасту, який може бути рівний нулю [11].

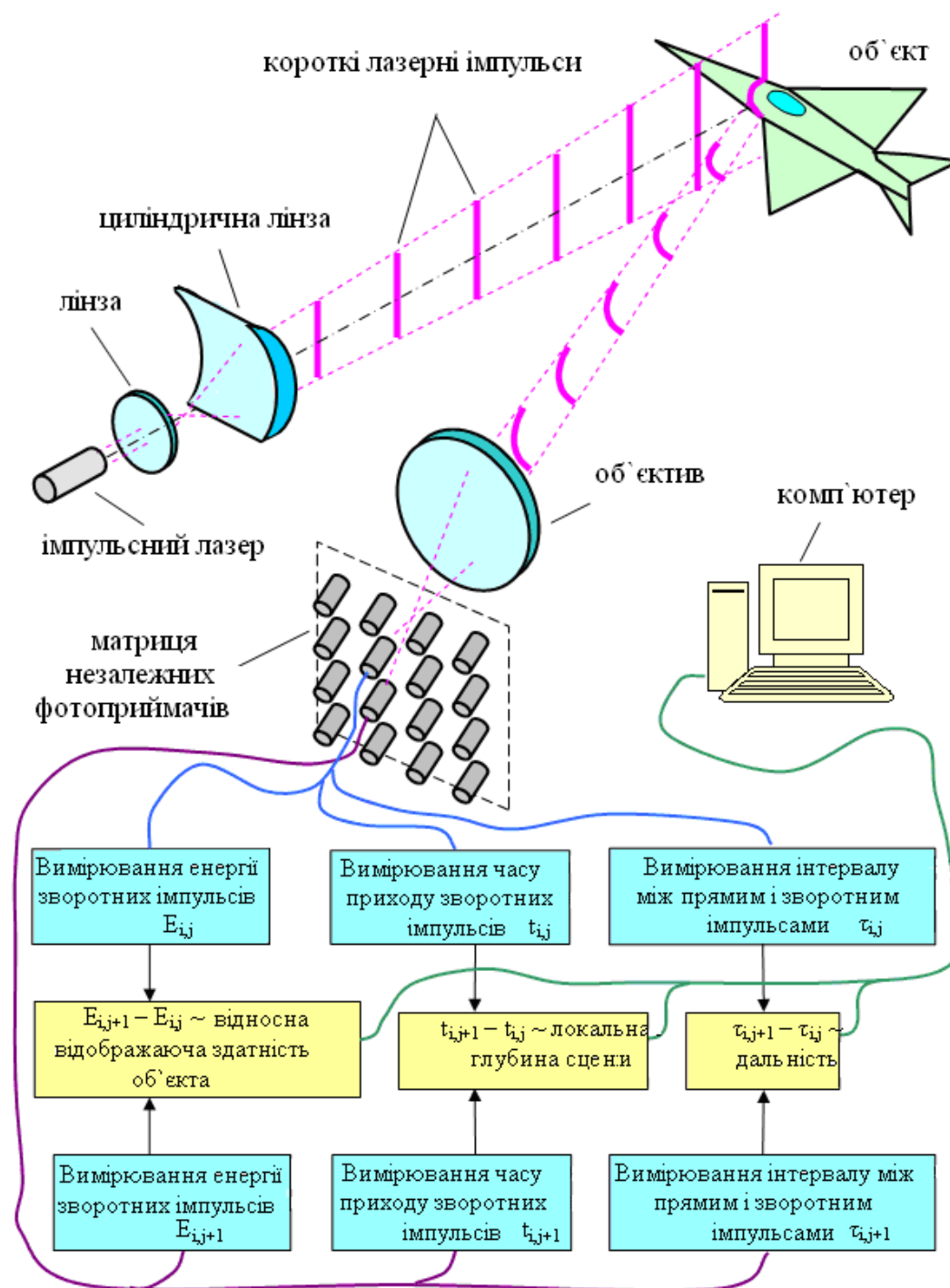


Рис.1.7 Принцип дії ладару

Функціональним призначенням тривимірного приймача є перетворення зображення об'єкту на фоточутливій поверхні в цифровий код, що містить інформацію про відбивні властивості і тривимірну форму об'єкту спостереження. Зображення спочатку реєструється первинним перетворювачем. Подальшу обробку електричного сигналу виконує блок аналогової обробки, який виділяє сигнал зображення і вимірює його параметри. Виміряні параметри сигналу зображення запам'ятовуються в блоці аналогової пам'яті. Цифрову обробку зображення здійснює сигнальний процесор.

Тривимірний приймач вимірює в кожному елементі енергію, момент приходу оптичного імпульсного сигналу, а також часовий інтервал між зондуючим і відбитим від об'єкту імпульсами. Дане завдання типове для часовимірювальної системи, для якої основними критеріями якості є роздільна здатність і точність часових вимірювань.

При цьому вимоги по часові роздільної здатності і точності відповідають пікосекундній області, гранично досяжної в даний час області вимірювання. Часові вимірювання забезпечує імпульсний режим роботи пристрою, який є типовим для даного класу приймачів зображення.

У тривимірному приймачі проводиться паралельна електронна обробка наносекундних імпульсних сигналів матричного детектора одночасно з усіх його елементів. У кожному каналі до мультиплексування потрібно виявити сигнал і виміряти декілька його параметрів, для чого потрібно до 10 швидкодіючих мікросхем на один канал. До особливостей паралельної електронної обробки слід віднести виникнення характерних перешкод, усунення яких є важко вирішуваним завданням.

2.АНАЛІЗ ЕЛЕМЕНТІВ КОНСТРУКЦІ ОПТОЕЛЕКТРОННОГО ДАТЧИКА.

2.1 Цифрова камера

Датчик зображення являє собою оптоелектронний прилад, який перетворює дійсне оптичне зображення в закодований електричний сигнал в одному з форматів цифрових зображень.

Структуру цифрової камери із ПЗЗ-датчиком зображення відображено на рис 2.1.

Фотооб'єктиви цифрових камер зазвичай менші за об'єктиви плівкових фотоапаратів: розмір кадру плівки становить 24х36 мм, а світлочутливої матриці - від 1,8х2,4 до 13,0х17,3 мм. У дзеркальних камерах, де розмір матриці сягає 24х36 мм, використовують такі ж об'єктиви, як і в плівкових фотоапаратах. Відмінність між дзеркальним та бездзеркальним камерами полягає в тому, що зображувану сцену спостерігають на екрані рідкокристалічного дисплея у першому випадку крізь об'єктив і напівпрозоре дзеркало, яке відводиться убік під час експозиції, а у другому - крізь додатковий об'єктив.

У професіональних камерах є стабілізатори зображення (механічні та цифрові), які компенсують дрижання рук фотографа або невеликі рухи об'єкта під час зйомки. У механічних стабілізаторах рух камери відслідковують акселерометри та гіроскопи, сигнали з яких керують електроприводами або спеціального оптичного елемента в об'єктиві, або самої матриці. У першому випадку змінюється хід променів в об'єктиві, у другому — просторове положення матриці. Цифрові стабілізатори вносять корективи в уже сформоване цифрове зображення.[5]

Автоматичне фокусування зображення здійснює кільцевий п'єзоелектричний двигун, вбудований в об'єктив.

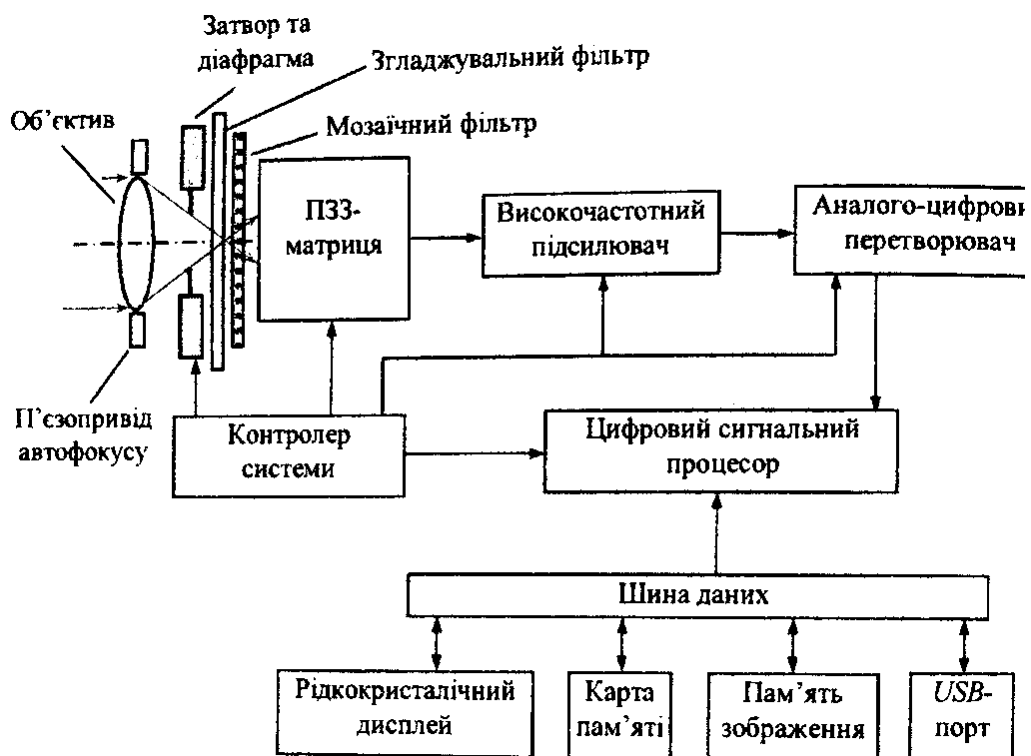


Рис. 2.1. Структурна схема цифрового фотоапарата із ПЗЗ-датчиком зображення.[5]

Затвор, який запускає і припиняє експонування світлочутливої матриці, у цифрових камерах використовують електронний, хоча у дорогих камерах його доповнюють механічним затвором, який запобігає засвічуванню матриці після експонування й утворенню паразитних зарядів.

Згладжувальний фільтр запобігає появі на зображенні муарових смуг, притому оптичний фільтр трохи розмиває зображення (коли потрібно і коли не потрібно), унаслідок чого зменшується його різкість, а оптико-механічний фільтр здійснює мікроколивання матриці і його можна виключити, коли на зображенні муарових смуг немає.

Взаємодію та керування усіма вузлами камери здійснює контролер системи (мікроконтролер). У професійних камерах для операцій з оброблення зображення використовують цифровий сигнальний процесор.

Чутливість цифрових камер. Чутливість цифрової камери завжди менша, ніж чутливість фотоприймальної матриці, оскільки частина світла втрачається внаслідок проходження крізь фотооб'єктив (до 10 % у складних об'єктивах).[5]

Порогова чутливість цифрової камери обмежена переважно тепловим шумом. Виробники цифрових камер зазначають у технічній документації тільки еквівалентну чутливість камери, наприклад, ISO 50-6400. Одиниці світлочутливості стандарту **ISO** уможливають порівняння чутливості заданого режиму роботи цифрової камери з чутливістю фотоматеріалу. Світлочутливість відеокамер визначають за значенням мінімальної освітленості, яке забезпечує отримання заданого відношення сигнал/шум.

Якщо у фотоматеріалів світлочутливість характеризує процеси, які виникають у матеріалі під дією світла, то у цифрових камер світлочутливість враховує чутливість матриці, шуми та коефіцієнт підсилення високочастотного підсилювача, алгоритм та розрядність АЦП (вища розрядність забезпечує менші шуми).

Збільшення чутливості досягається за рахунок підсилення сигналу матриці, а підсилення в m разів збільшує у стільки ж разів і шуми. Задовільній якості цифрового зображення відповідає відношення $S/N=10$ (20 дБ), а відмінній - 40 (32 дБ).[5]

ПЗЗ-датчики зображення

Прилад із зарядовим зв'язком (англ. charge-coupled device, CCD) - це аналогова інтегральна схема, в якій є лінійка електродів (затворів), подаванням на які відповідних потенціалів створюють лінійку потенціальних ям, в яких накопичуються інформаційні електричні заряди, з періодичною зміною їх глибини ці заряди переносять на вихід схеми. Електричний заряд,

перенесений на вихід ПЗЗ, заряджає конденсатор і перетворюється в напругу сигналу. Цей сигнал подається на вхід підсилювача, розміщеного на друкованій платі датчика зображення. Аналого- цифрове перетворення та більшість функцій, необхідних для роботи датчика, реалізовано на друкованій платі.

Є декілька варіантів перенесення заряду в ПЗЗ-датчиках, а відповідно, і типів таких датчиків:

- датчик із міжрядковим перенесенням (англ. *interline-transfer CCD, IT-CCD*);
- датчик із міжрядковим перенесенням кадру (англ. *interline-transfer CCD, FIT-CCD*);
- датчик із перенесенням кадру (англ. *frame-transfer CCD*);
- датчик із перенесенням повноформатного кадру (англ. *full-frame-transfer CCD, FFT-CCD*).[5]

Перші три типи датчиків використовують переважно у відеокамерах, четвертий тип - у цифрових камерах наукового призначення, оскільки він уможливорює проведення спектрофотометричних вимірювань.

КМОН-датчики зображення

Комплементарна метал-оксид-напівпровідникова технологія, або КМОН-технологія (англ. *CMOS, complementary metal-oxide-semiconductor*), є базовою технологією мікроелектроніки у процесі виготовлення інтегральних схем, зокрема логічних схем, схем статичної пам'яті, мікропроцесорів та частини датчиків зображення. Основними елементами в таких інтегральних схемах є пари комплементарних МОН-транзисторів — польових транзисторів з каналами *p*- та *n*-типу. КМОН-технологія замінила біполярну технологію і витіснила її з багатьох сфер завдяки тому, що КМОН-схеми майже не споживають електроенергії у статичному режимі (споживання енергії відбувається під час перемикання станів схеми), мають більшу швидкодію, кращу заводо захищеність і можливість більш щільно розміщу-

вати транзистори на підкладці. Останньому сприяє й те, що у статичному режимі майже немає виділення джоулевого тепла, з яким важко боротись унаслідок низької теплопровідності кремнію. Ефективне відведення тепла від комп'ютерного процесора дає змогу підвищити його тактову частоту, а отже, і швидкість оброблення інформації. Багато енергії розсіюється на між'єднаннях процесора, і перехід від електричних зв'язків до оптичних дозволить зменшити тепловиділення та збільшити тактову частоту процесора від нинішніх одиниць гігагерців до десятків гігагерців, на яких можуть працювати КМОН-транзистори.[5]

Інтегральна схема КМОН-матриці датчика зображення, на відміну від інтегральної схеми ПЗЗ-матриці, є цифровою схемою, в якій реалізовано більшість функцій, потрібних для роботи датчика.

Параметри та характеристики датчиків зображення

Спектральний діапазон. Переважну більшість датчиків зображення призначено для роботи з видимим випромінюванням. Кремній, який використовують у фоточутливих елементах подібних матриць, здатний реєструвати і ближнє інфрачервоне випромінювання (з довжинами хвиль до 1100 нм). У цьому легко пересвідчитись, спрямувавши пульт дистанційного керування телевізором на камеру мобільного телефону. У світлодіода пульта довжина хвилі випромінювання приблизно 900 нм.

Квантова ефективність. Квантова ефективність цифрової камери - це відношення кількості електронів інформаційних зарядів, накопичених у всіх потенціальних ямах матриці за проміжок часу Δt , до кількості фотонів, перехоплених фотооб'єктивом за той самий проміжок часу.[5]

Просторова роздільна здатність. Роздільна здатність фотоприймальної матриці визначається кількістю пікселів, які може утворити у цифровому зображенні певна матриця. Роздільна здатність вимірюється і мегапікселях (Мп).[5]

Глибина кольору. Глибина кольору - це енергетична роздільна здатність, яка визначає, скільки відтінків певного кольору у вихідному зображенні й відповідно скільки рівнів яскравості предмета певного кольору може передати цифрова камера. Рентгенівські камери передають величини прозорості предмета вигляді відтінків сірого кольору в чорно-білому зображенні.

Динамічний діапазон. Динамічний діапазон світлочутливої матриці - це виражене в децибелах відношення максимальної та мінімальної освітленості матриці, за якого спостерігається цифрове зображення, допустимо спотворене внаслідок насичення пікселя і непропорційності між освітленістю та утвореним зарядом.[5]

Чутливість. Чутливість елемента фотоприймальної матриці, як і будь-якого іншого фотоприймача, поділяють на інтегральну та спектральну (монохроматичну).

Шуми датчиків зображення

У цифровому зображенні шуми датчика зображення проявляються у вигляді пікселів зі спотвореними яскравістю або кольором.

У датчиках зображення, зокрема одновимірних, спостерігаються такі шуми, як:

- тепловий шум;
- дробовий шум;
- $1/f$ -шум;
- генераційно-рекомбінаційний шум;
- шум фіксованого розподілу;
- телеграфний шум;
- шум зчитування (скидання) заряду з пікселя;
- шум Фано;
- шум перенесення заряду.

Найбільш сильними серед цих шумів є тепловий та дробовий шуми.[5]

Тепловий шум. Основним джерелом теплового шуму в датчиках зображення є транзистор повторювана витоку, який передає фотоелектричний сигнал з фотоприймача на зсувний регістр. Через відмінності в архітектурі ПЗЗ- та КМОН-датчиків тепловий шум ПЗЗ-датчика надходить на вихід у всій смузі частот матриці, тоді як у КМОН-датчику - тільки у смузі частот рядка. Оскільки потужність теплового шуму (як «білого» шуму) пропорційна ширині смуги частот, то тепловий шум КМОН-датчика виявляється меншим, причому цей шум майже не залежить від відеочастоти.[5]

В датчиках ємнісного типу, до яких, зокрема, належать і датчики зображення, тепловий шум виникає також на еквівалентній ємності пікселя C , причому середня квадратична напруга цієї складової теплового шуму $U_{n-t} = \sqrt{kt/c}$ де k - стала Больцмана; t - температура датчика. Цей вид теплового шуму домінує у пікселях з великою площею світлочутливої поверхні фотодіода. Для зменшення теплового шуму використовують розсіювані надлишкового тепла - радіатори, а також (переважно в студійній апаратурі) мікрохолодильники на ефекті Пельтьє.

Для часткової компенсації темнового струму периферійні елементи матриці, розміщені по її периметру, покривають непрозорим матеріалом і накопичуваний в них заряд використовують як «рівень чорного», від якого йде відлік величини заряду, генерованого фотонами.

У КМОН-датчиках зображення поріг чутливості зумовлюється тепловим шумом і становить $4,6 \cdot 10^{-12}$ Дж.

Дробовий шум. Дробовий шум пов'язаний з дискретною природою фотонів та електронів. Спектральна густина цього шуму не залежить від частоти, тобто, як і тепловий шум, він є «білим» шумом. Середня квадратична напруга дробового шуму пропорційна кореню квадратному зі смуги частот.

Дискретність світлового потоку і неодночасність прильоту фотонів на фотоприймач та їх перетворення у фотоелектрони викликає появу фотонного

дробового шуму, який у разі надходження за час експозиції у середньому q фотонів викликає генерацію шумових фотоелектронів.[5]

Дробовий шум темного струму I_d за час експозиції t спричиняє появу шумових електронів. Якщо фотонний дробовий шум зменшити не можна, то темновий дробовий шум ППЗ-матриці зменшується за її охолодження і переходу на інвертований режим роботи, коли носієм сигналу стають дірки.

1/f-шум. Джерелом цього шуму є переважно польовий транзистор повторювана витоку, а також схема зчитування. Шум швидко спадає з частотою. Його внесок у загальний шум стає суттєвим за малих освітленостей, коли час накопичення заряду $t_q > 100$ мс.

Шум зчитування. Шум зчитування (англ. *readout noise*) - це флуктуації вихідної напруги без освітлення матриці.

Шум фіксованого розподілу. Шум фіксованого розподілу (англ. *fixed-pattern noise*) проявляється на цифровому зображенні у вигляді сплесків яскравості окремих пікселів, причому розподіл таких «гарячих» пікселів по полю цифрового зображення залишається незмінним за тривалої експозиції або від експозиції до експозиції. У разі нетривалих експозицій розподіл «гарячих» пікселів може змінюватися, так само як і при зміні підсилення, освітленості або температури. Причинами появи цього шуму є:

- порушення синхронності подавання потенціалів на електроди матриці;
- розкид величин цих потенціалів;
- відхилення у розмірах світлочутливої поверхні фотодіодів;
- розкид квантової ефективності матричних пікселів;
- розкид коефіцієнтів підсилення індивідуальних піксельних підсилювачів КМОН-датчиків тощо.[5]

Телеграфний шум (англ. *random telegraph signal noise* - шум випадкового телеграфного сигналу, *RTS-шум*) виглядає як випадкова послідовність

приблизно однакових за амплітудою (частки мілівольта) імпульсів, тривалість яких коливається від мілісекунд до секунд.

Шум Фано. Невід'ємною складовою шумів ПЗЗ- та КМОН-датчиків зображення є шум Фано, який обмежує чутливість цих датчиків.

Процес падіння фотонів на фоточутливий елемент датчика зображення є пуассонівським процесом, який описує кількість фотонів, яка впала на поверхню елемента за незмінної величини його освітленості (аналог - кількість крапель дощу, яка падає на деяку площу поверхні води). Акти падіння фотонів або крапель дощу є випадковими подіями. Якщо вести відлік від певної події, яка трапилася в момент t_0 невеликій ділянці поверхні з координатами (x_0, y_0) , то наступна подія спостерігатиметься в момент $t_0 + \delta t$ на ділянці з координатами $(x_0 + \delta x, y_0 + \delta y)$, де δt , δx , δy - випадкові величини. На ділянці з координатами (x_0, y_0) наступна подія станеться теж через випадковий проміжок часу. Кожне середовище після збурення (порушення локальної термодинамічної рівноваги) потребує деякого часу (часу релаксації) для повернення у початковий стан, тому виникає ефект «пам'яті» середовища, за якого відбувається взаємний вплив подій, рознесених у часі та просторі.[5]

Шум Фано тісно пов'язаний з якістю фоточутливого матеріалу. Цей шум характеризують коефіцієнтом Фано, який є своєрідним відношенням сигнал/шум - мірою достовірності, з якою випадкова змінна може бути оцінена за проміжок часу Δt , в якому в середньому відбувається декілька випадкових подій: $k_F = \sigma_{\Delta t} / \mu_{\Delta t}$, де $\sigma_{\Delta t}$ - дисперсія, а $\mu_{\Delta t}$ - середнє значення випадкової змінної за проміжок часу Δt . Коефіцієнт Фано для кремнію за $T = 300$ К становить 0,115.

Шум перенесення заряду. Цей шум був помітний у матрицях, в яких перенесення заряду здійснювалося каналами, розміщеними на поверхні напівпровідника, безпосередньо під оксидним шаром. У сучасних матрицях заряди переносяться схованими каналами (англ. *buried channels*), розміщеними у глибині напівпровідника. Це дозволяє не тільки позбутися

шуму перенесення, але й збільшити швидкість перенесення заряду, оскільки електрони не захоплюються поверхневими пастками напівпровідника і переміщення пакета електронів не гальмується.[5]

2.2 Лазерний діод, принцип дії, технологія, параметри.

Найбільш поширені на сьогоднішній день лазерні діоди (ЛД) з подвійною гетероструктурою (ПГС), яка утворена переходами типу N-p-P і P-n-N. При їх виготовленні потрібно ретельне відпрацювання технологічного циклу, оскільки в області переходів відбувається контакт двох різних матеріалів, що відрізняються, хоча і незначно, будовою кристалічної решітки. Від якості вирощування такої структури в цілому залежать всі експлуатаційні характеристики випромінювача. За рахунок застосування ПГС з'являється можливість:

- збільшення ефективності інжекції;
- збільшення внутрішньої квантової ефективності;
- зменшення втрат випромінювання на поглинання в матеріалі ЛД.[9]

На рис. 2.2 показана спрощена схема ЛД на основі ПГС типу N-P-N. Вона являє собою поперечний розріз аналізованого елемента. Як правило, в сучасних ЛД використовується осьове випромінювання, при якому формується потік фотонів, який поширюється уздовж вузькозонного шару d .

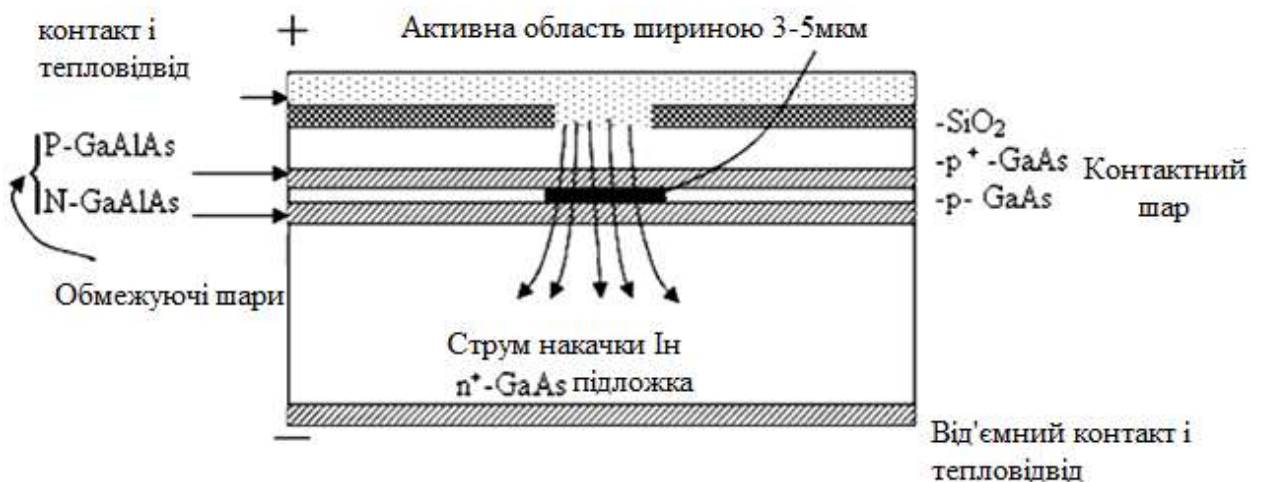


Рис. 2.2. Структура поперечного перерізу смужкового лазера типу N-p-P [6].

Активна область представляє собою матеріал з більш високим значенням діелектричної проникності. Хвиля, що формується на її кордонах

може зазнавати повного внутрішнього відбиття. Тоді активна область може бути представлена у вигляді відрізка діелектричного хвилеводу. Торці області, які виконують роль напівпрозорих дзеркал, «перетворюють» активну область з хвильової точки зору в діелектричний резонатор.

Також в даний час все більш широке поширення набувають лазерні діоди на основі гетероструктур з квантово-розмірною активною областю (квантовою ямою). Такі лазери часто називають гетеролазери з квантовою ямою. Зменшення товщини активного шару гетеролазера, що представляє собою потенційну яму, до величини, порівнянної з довжиною хвилі де Бройля ($\lambda = h/p = 10\text{нм}$) призводить до двовимірного квантування і виникнення дискретних енергетичних рівнів. Ширина квантової ями і її склад визначає кількість рівнів в її межах і відповідні енергії, визначаючи таким чином довжину хвилі випромінювання. На рис. 2.3 схематично показана InGaAs / GaAs / InGaP лазерна гетероструктура з квантової ямою і її зонна діаграма.

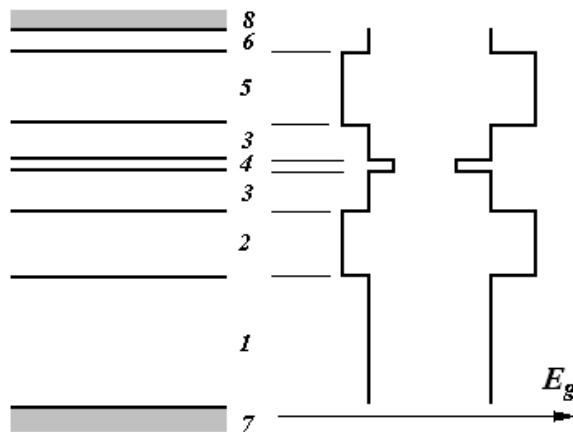


Рис. 2.3. Лазерна гетероструктура з квантовою ямою і її зонна діаграма: 1 – p^+ -GaAs підкладка; 2 – обмежувач шар n-InGaP; 3 – хвилевідний шар GaAs; 4 – активна область InGaAs; 5 – обмежувач шар p-InGaP; 6 – контактний шар p^+ -GaAs; 7, 8 – омічні контакти [6].

Якщо забезпечити безперервний приплив електронів в С-зону і їх відтік з V-зони, то електрони з зони провідності будуть безперервно рекомбінувати

з дірками з валентної зони, випромінюючи кванти світла з енергією $\hbar\omega$, яка дорівнює відстані між задіяними в рекомбінації рівнями (рис. 2.4). У структурах з квантовими ямами функція щільності станів має ступінчастий вигляд.

Перевага гетеролазера з квантовими ямами полягає у високій квантовій ефективності, низькому пороговому струмі і слабкій чутливості до змін температури.[9]

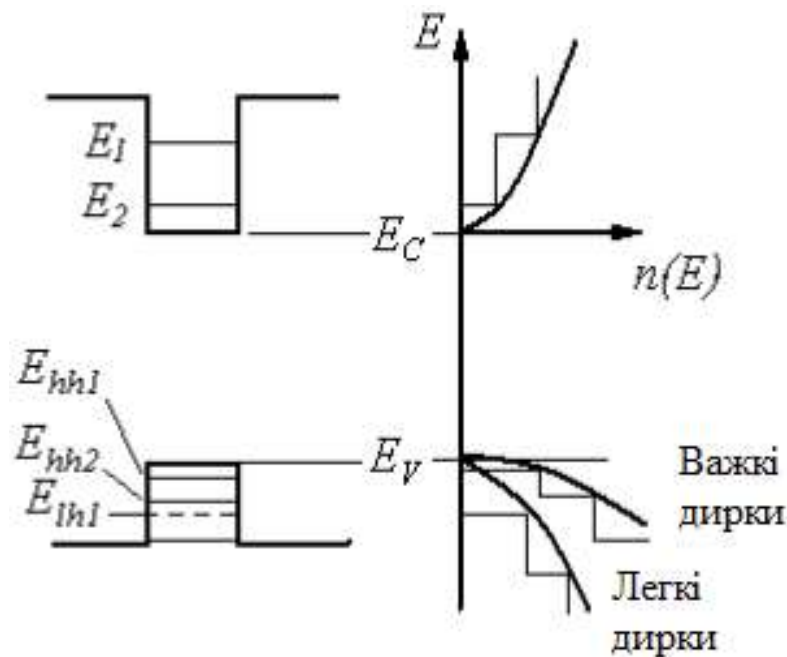


Рис. 2.4. Зонна діаграма і діаграма щільності станів в гетеролазерах з квантовою ямою: E_{hh1} , E_{hh2} – рівні важких дірок, E_{lh1} – рівень легких дірок [6].

До числа основних характеристик напівпровідникового лазера відносять:

Ват-амперна характеристика. Залежність потужності випромінювання від струму накачування (ват-амперна характеристика) при різних значеннях температури показана на рис. 2.5.

При малих токах накачування ($I_n < I_n$) лазер працює подібно LED: відбувається спонтанна випромінювальна рекомбінація і випромінювання ЛД некогерентне і неполяризоване. При перевищенні порогового значення струму ($I_n > I_n$) настає лазерний ефект, генерована оптична потужність різко зростає, випромінювання стає вимушеним. Як видно, ват-амперна характеристика істотно нелінійна. З цієї причини модуляція вихідного напруги шляхом зміни аналоговим сигналом струму інжекції лазера без застосування спеціальних заходів лінеаризації ват-амперної характеристики практично не використовується.

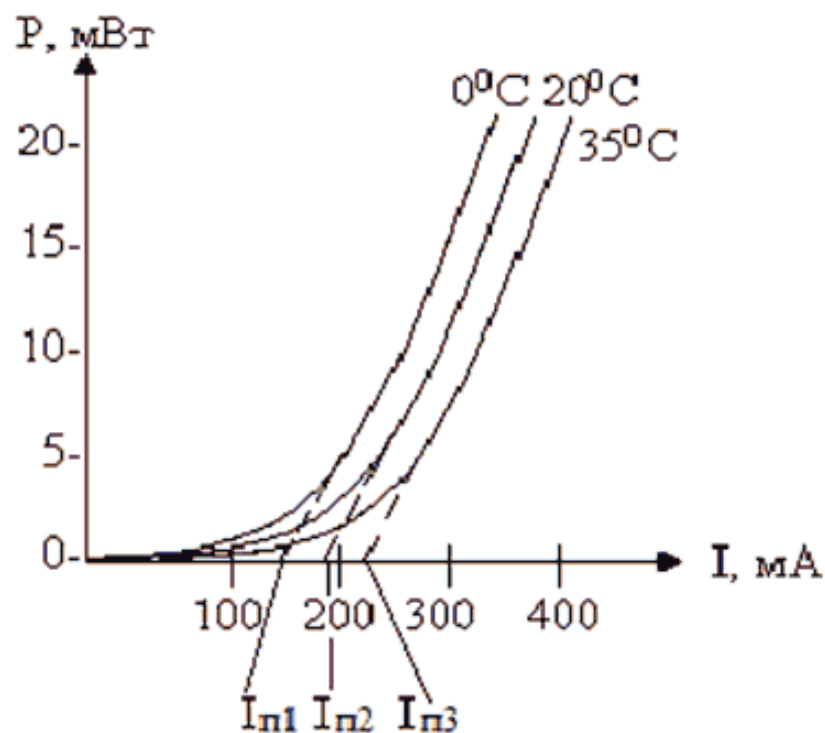


Рис. 2.5. Ват-амперні характеристики напівпровідникового ЛД [6].

Зазвичай застосовують імпульсні методи модуляції струму інжекції і, відповідно, вихідної оптичної потужності лазера. Відзначимо ще одну істотну особливість, притаманну лазерному діоду: при зміні температури навколишнього середовища відбувається зсув ват-амперних характеристик. Це призводить до зміни величин порогового струму і вихідної потужності. Для усунення цього недоліку застосовуються електричні схеми компенсації.

Діаграма спрямованості. Типова діаграма спрямованості оптичного випромінювання ЛД показана на рис. 2.6,а.

Як видно, діаграма випромінювання лазера несиметрична (рис. 2.6, б). Її ширина, яка вимірюється на рівні половинної потужності, 20° менш в площині, паралельній переходу, і більш 40° в перпендикулярній площині. На рис. 2.6, в, показана залежність випромінюваної потужності від кута у взаємно перпендикулярних напрямках. Діаграма спрямованості має форму еліптичного конуса.

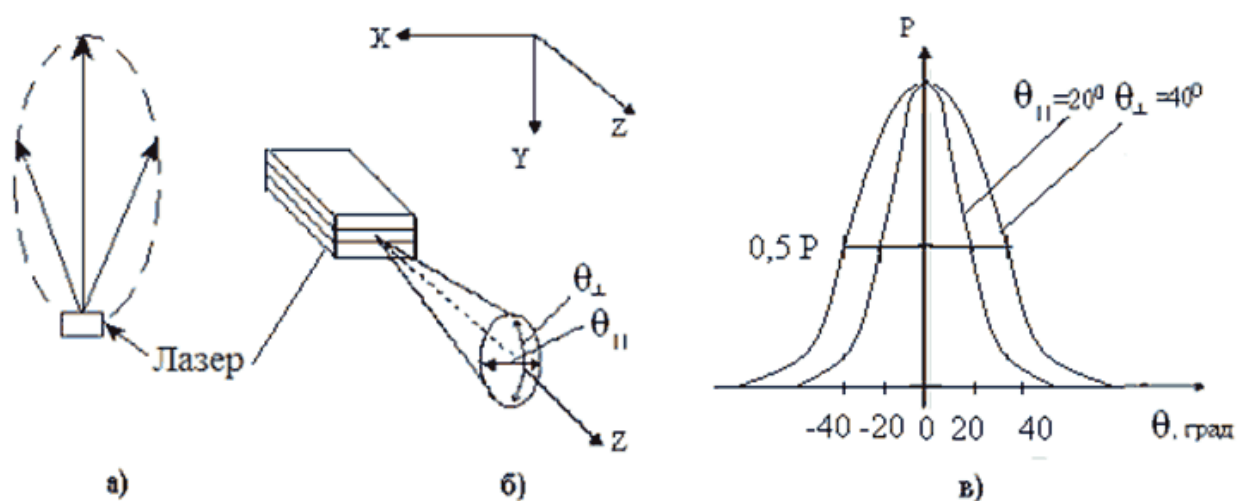


Рис. 2.6. Діаграма спрямованості і характер оптичного випромінювання ЛД:

а – діаграма спрямованості; *б* – конус випромінювання; *в* – залежність випромінюваної потужності від кута у взаємно перпендикулярних напрямках [6].

Довжина хвилі випромінювання. Довжиною хвилі випромінювання ЛД вважається довжина хвилі λ_0 , на якій вихідна потужність максимальна.

Спектральна ширина випромінювання $\Delta\lambda$ - інтервал довжин хвиль, в якому спектральна потужність становить половину максимальної. Реально смуга пропускання резонатора обмежена і спектр випромінювання ЛД

складений з відносно вузьких ліній. На рис. 2.7 показана залежність спектральної потужності $P(\Delta\lambda)$ від довжини хвилі для різних ЛД.

У багатомодових ЛД ширина кожної окремої лінії $\delta\lambda = 1\text{--}3\text{ нм}$, інтервал між ними становить $2\text{--}5\text{ нм}$. У одномодових ЛД ширина спектральної лінії, що складається з однієї поздовжньої моди $\delta\lambda = 0,1\text{--}0,4\text{ нм}$. Головна відмінна риса спектра ЛД – лінійчата структура і значно вужчий спектр.

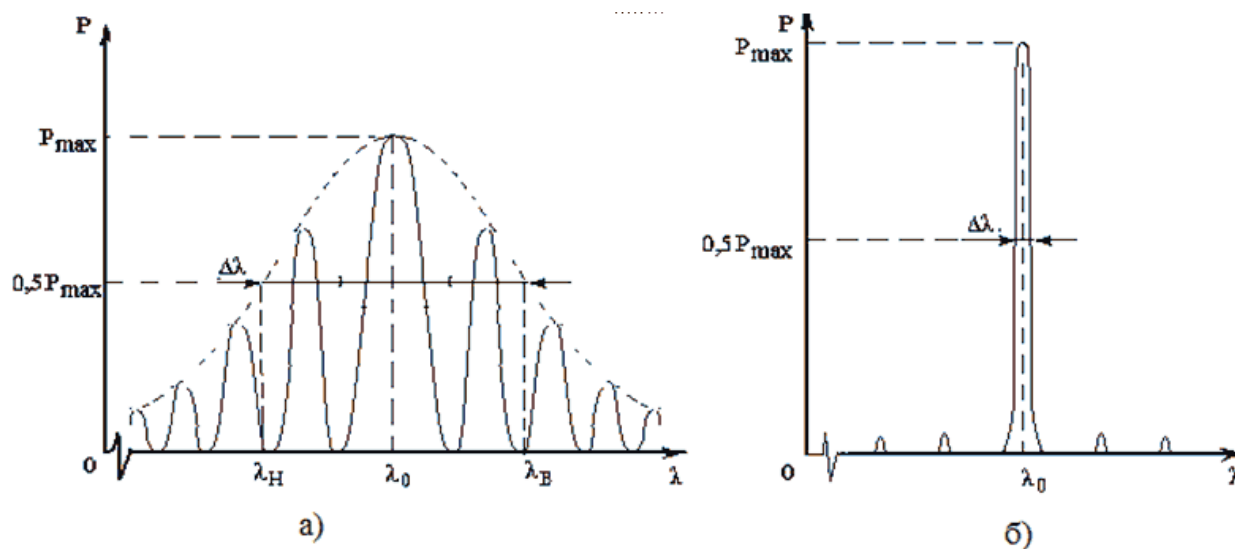


Рис.2.7. Спектральні характеристики багатомодового (а) і одномодового (б) ЛД [6].

Поляризація випромінювання. Лазерний діод забезпечує генерацію декількох окремих «майже» монохроматичних хвиль, які можна вважати частково поляризованими - орієнтація векторів електромагнітного поля визначена топологічної схемою ЛД.

Технологія виготовлення напівпровідникових лазерів.

Епітаксія. Для вирощування лазерних структур застосовуються різні епітаксіальні методи. Історично першим був метод рідиннофазної епітаксії (вирощування напівпровідникової структури з розплаву), з його допомогою були синтезовані перші напівпровідникові гетероструктури, в тому числі перші гетеролазери. На сьогоднішній день найбільш придатними для формування напівпровідникових наногетероструктур є методи молекулярно-

променевої епітаксії (МПЕ) і епітаксії з металоорганічних сполук (МОС ГФЕ). Молекулярно-променева епітаксія є процесом епітаксiального росту в результаті взаємодії одного або декількох атомарних чи молекулярних пучків з нагрітою кристалічною підкладкою в умовах надвисокого вакууму. Існує кілька різновидів молекулярно-пучкової епітаксії. Найбільш поширена з твердотільними джерелами: молекулярні пучки утворюються в результаті випаровування речовини, завантаженої в ефузійні комірки, виготовлені з термічно стійкого матеріалу. Потік частинок що надходять до підкладки пропорційний тиску парів в комірці, та регулюється температурою. Плавна зміна складу, легування і швидкості росту контролюється зміною температури комірки, а різка зміна вирощуваного матеріалу здійснюється закриттям заслінок відповідних комірок. В інших різновидах методу всі або деякі речовини можуть подаватися в газоподібному вигляді. Наприклад. Миш'як вводиться в систему у вигляді арсину (AsH_3), що розкладається на миш'як і водень.

Молекулярно-променева епітаксія дозволяє вирішувати наступні завдання:

1. Отримання кристалічних плівок високої чистоти - за рахунок надвисокого вакууму і чистоти вихідних матеріалів;
2. Отримання різких профілів складу і легування - внаслідок малого часу спрацьовування заслінок і відносно низьких температур зростання, перешкоджають дифузії;
3. Отримання надтонких шарів контрольованої товщини при типових швидкостях росту, що становлять кілька ангстрем в секунду.

В даний час у виробництві гетероструктур широко застосовується метод газофазної епітаксії з металоорганічних сполук (МОС ГФЕ). Цей метод вважається більш продуктивним і не вимагає дорогого устаткування. У МОС ГФЕ для підведення речовини (прекурсору) до зростаючого шару використовуються леткі металоорганічні з'єднання. Для епітаксії напівпровідників A_3B_5 застосовуються такі сполуки як триметилгалій

(TMGa), триметиліндій (TMIn), триметилалюміній (TMAI). Елементи п'ятої групи подаються у вигляді гідридів: арсин (AsH_3) і фосфін (PH_3). Процес епітаксiального росту методом МОС ГФЕ включає перенесення речовини-прекурсора за допомогою газу-переносчика (водень) до гарячої зони реактора біля підкладки (реактор може бути горизонтальним або вертикальним), де прекурсори розкладаються або вступають в хімічні реакції, в результаті яких відбувається епітаксiальне нарощування кристалічної плівки на підкладку. При МОС ГФЕ мають місце поверхневі явища такі як адсорбція, десорбція молекул речовини-прекурсора, поверхнева дифузія, зростання кристала, десорбція продуктів реакції. Схема установки для МОС ГФЕ показана на рис. 2.8.

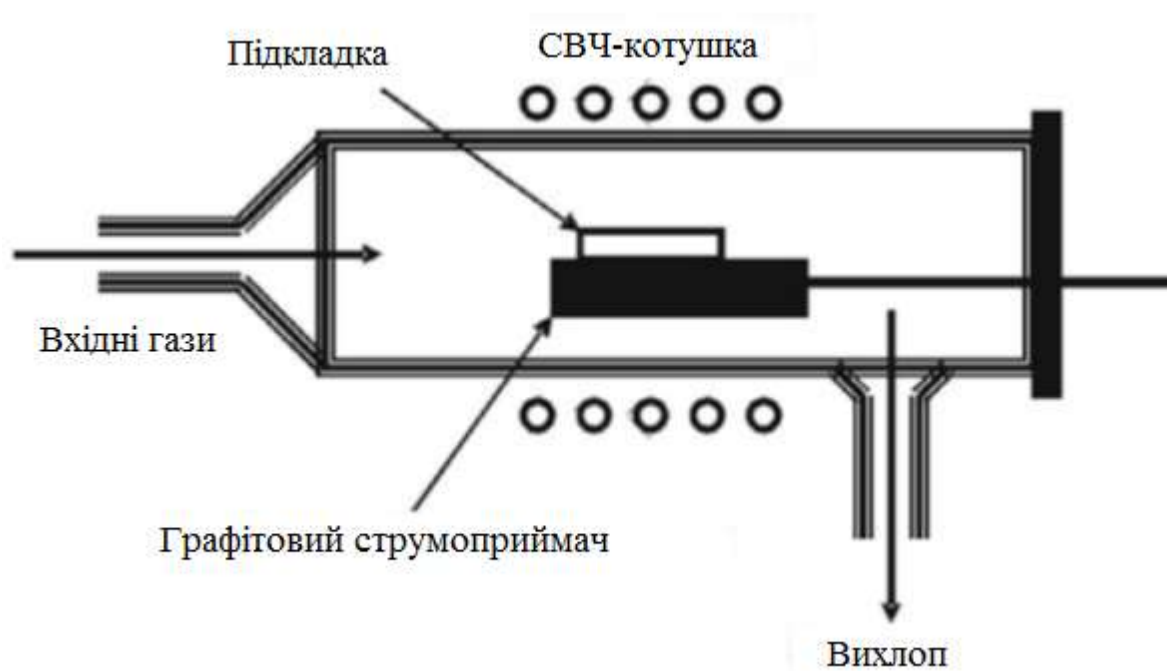


Рис. 2.8. Установка МОС ГФЕ з горизонтальним реактором [7].

Метод газофазної епітаксії відноситься до методів з обмеженим масопереносом. У першому наближенні швидкість росту і хімічний склад за елементами III групи визначається парціальними тисками металоорганічних реагентів в реакторі. Оскільки хімічні речовини, що містять атоми V групи, є сильно летючими, вбудовування атомів V групи самообмежується. Процес проводиться в умовах надлишку атомів V групи (відношення складає від 50

до 100), парціальний тиск атомів V групи вельми слабо впливає на швидкість росту, а їх надлишок не вбудовується в зростаючий шар. Швидкість зростання і хімічний склад зростаючого шару (за елементами III групи) відносно нечутливі до температури осадження. Таким чином, швидкості росту, а також склади потрібних або четверні з'єднань задаються парціальними тисками металоорганічних реагентів, а точність, з якою ці парціальні тиску можуть контролюватися, визначає в значній мірі відтворюваність епітаксialного процесу.

Формування активної області лазерного діода.

Структури, в яких існує обмеження для носіїв і випромінювання тільки в напрямку, перпендикулярному p-n - переходу, називаються лазерами з широким контактом. Але більша частина лазерів має смугову геометрію активної області, в якій область протікання струму обмежена також і по площині p-n - переходу. Ширина смужок зазвичай дорівнює 5 - 200 мкм. За допомогою створення смугової геометрії досягається латеральна локалізація енергії електромагнітного випромінювання за рахунок того, що тільки під смужкою концентрація носіїв заряду виявляється досить високою для подолання оптичних втрат. Таким чином, щоб обмежити світлову хвилю необхідно придушити бічні витоку струму. Розтікання струму призводить до того, що певна концентрація нерівноважних носіїв існує не тільки в межах контакту, але і поза цією областю. На рис. 2.9, б показано схематичне зображення шляхів протікання струму (суцільні лінії) і концентрації носіїв в активній області (заштрихована область) в лазері смужкової конструкції. На рис. 2.9 представлені різні конструкції смужковго лазера. Всі вони мають свої переваги і недоліки. Найбільш простий випадок – лазер з широкими смуг.

Для його виготовлення на пластину наносяться металеві контакти, причому верхній контакт являє собою металевий смужку, розташовану перпендикулярно до граней лазера.[9]

Відмінність конструкції смужкового лазера зображеного на рис. 2.9, в, полягає в тому, що сильнолегований контактний напівпровідниковий шар видалений в області поза металевою смужкою. Це призводить до зниження латерального розтікання. Іноді також видаляється частина верхнього емітерного шару. Однак, в цьому випадку латеральне обмеження світлової хвилі здійснюється за рахунок просторово-неоднорідного оптичного посилення.

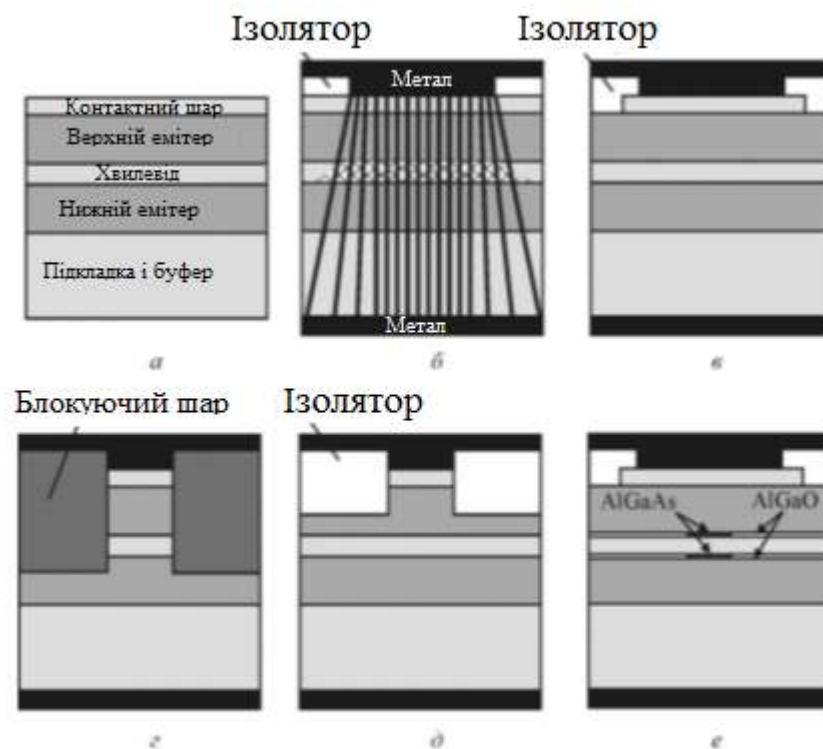


Рис. 2.9. Варіанти конструкції смужкових лазерів: вихідна структура (а), лазери з широкими смужками (б, в), лазер з зарощеною структурою (г); лазер з гребінчастим хвиелеводом (д); лазер з селективним оксидуванням (е) [7].

Найкраще придушення розтікання і найкраще латеральне обмеження світлової хвилі досягається в так званій зарощеній або схованій структурі (рис. 2.9, г). Подібні структури можуть бути сформовані травленням глибоких мез - крізь хвилевід і активну область лазера з подальшим зрощенням порожнеч напівпровідниковим матеріалом з меншим показником заломлення і більшою шириною забороненої зони.

Конструкція з використанням глибокої мези зазвичай є неприйнятною для лазерних структур, що містять алюміній (AlGaAs). Для таких лазерів розроблена конструкція гребінчастого хвилеводу (рис. 2.9, д). Такий лазер формується травленням дрібної мези. Тут фронт травлення не досягає хвилевідного шару і активної області, так що відбувається лише заглиблення в шар верхнього емітера.

Лазери з селективним оксидуванням (рис. 2.9, е) представляють собою конструкції, в яких як для обмеження латерального розтікання носіїв, так і для обмеження світлової хвилі використовуються тонкі оксидні шари, сховані в товщі напівпровідникової структури. При епітаксиальному зростанні лазерної структури, на додаток до інших шарів, вирощують один або два шари AlGaAs з високим вмістом Al (98%). Ці шари розташовуються з однієї або двох сторін активної області.

Будучи поміщеними в атмосферу, що містить пари води, швидко оксидується, так що вихідний напівпровідниковий шар AlGaAs перетворюється в діелектричний шар AlGaO.

Створення омичних контактів на лазерній гетероструктурі

Важливим етапом у виготовленні лазерного діода є формування омичного контакту. Як відомо, опір таких контактів не повинен залежати від величини і напрямку струму. Іншими словами ці контакти повинні володіти практично лінійної вольт-амперної характеристикою. При цьому опір контактів має бути малим, так як послідовний опір структури в цілому впливає на основні характеристики та деградаційні властивості лазера. Наприклад, зміна порогової щільності струму в істотному ступені залежить від послідовного опору структури. При малих значеннях граничної щільності струму значення наведеного ККД прагне до одиниці незалежно від значення питомого опору (рис. 2.10). З іншого боку, коли значення питомого опору мале (наприклад, 10^{-6} Ом•см², що є практично недосяжним рівнем технології), значення наведеного ККД залишається прийнятно високим в досить широкому діапазоні порогової щільності струму. При питомому

послідовному опорі на рівні $10^{-4} \text{ Ом} \cdot \text{см}^2$, що відповідає типовим експериментальним значенням для багатьох напівпровідникових лазерів, для можливості досягнення високих значень ККД гранична щільність струму не повинна перевищувати приблизно 1 кА/см^2 .

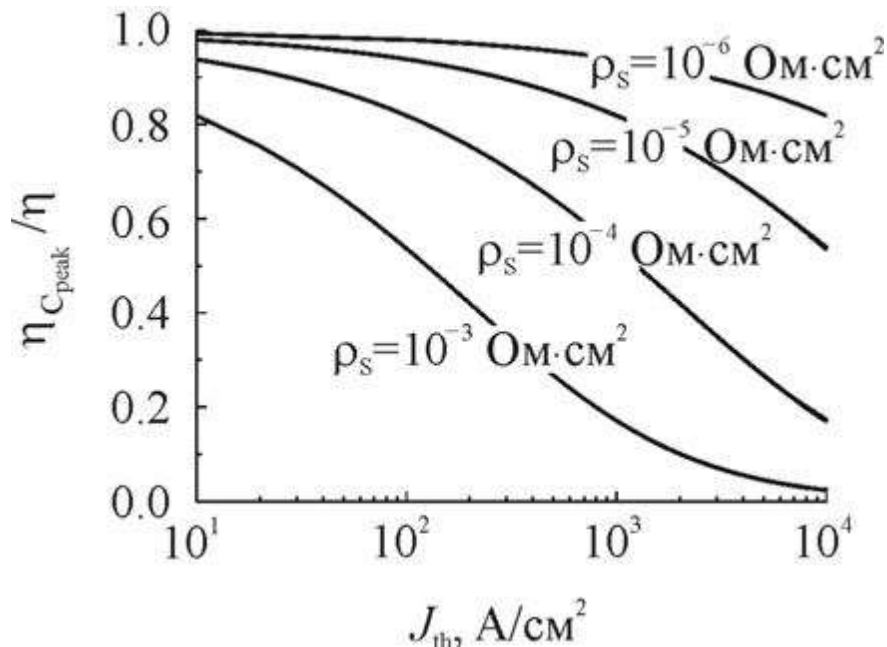


Рис. 2.10. Залежність максимального ККД лазера від порогової щільності струму при різних значеннях питомого послідовного опору структури [6].

Існує велика кількість методів отримання низькоомних контактів на лазерних гетероструктурах. Наприклад, для забезпечення омичності контакту часто використовується верхній шар p^+ -GaAs. Для забезпечення низькоомного контакту p^+ - поверхні з тонким шаром металу проводиться дифузія Zn зі збагаченого по As джерела при підвищеній температурі. Контакт до підкладки n^+ -GaAs можна отримати шляхом послідовного напилення шарів золота, германію та нікелю з подальшим відпалом в атмосфері азоту або водню при підвищеній температурі. Подібний контакт дає малий контактний опір за рахунок того, що при дифузії Ge в GaAs під контактом утворюється сильнолегована вироджена область напівпровідника. Це сприяє появі тунельної провідності носіїв заряду і, відповідно, омичній поведінці контакту.

2.3 Схема датчика рельєфу

Функціями датчика рельєфу є:

- формування тривимірного оптичного сигналу $s(x, z, \lambda)$, що представляє собою кольорову профільну лінію, локально пофарбовану відповідно до відбивної здатності поверхні на довжинах хвиль $\lambda_R, \lambda_G, \lambda_B$, зонduючого лазерного випромінювання;

- квантування оптичного сигналу по координатах x, z і λ , тобто представлення кольорової профільної лінії матрицею пікселей з координатами (x_i, z_j, λ_k) , де $i = 1..I$, I - число фотоприймачів у рядку матричного фотоприймача; $j = 1..J$, J - число фотоприймачів у стовпці матричного фотоприймача; $k = 1..K$, — число переданих кольірних відтінків;

- формування електричних сигналів для обробки інформації на комп'ютері.

Датчик рельєфу складається з лазерного генератора триколірної лінії, цифрової відеокамери, кишенькового комп'ютера.

Лазерний генератор лінії (рис. 2.11) складається з лазерних діодів з червоним (R), зеленим (G) і синім (B) кольором випромінювання, сферичної лінзи, паралельне випромінювання лазерів і циліндричної лінзи, що перетворює циліндричний пучок з круглою формою перетину в плоский пучок з лінійною формою перетину. Генератор лінії являє собою лазерний модуль, що містить оптичну систему, сполучену в одному корпусі з лазерним діодом та драйвером, що забезпечує стабільність потужності випромінювання.

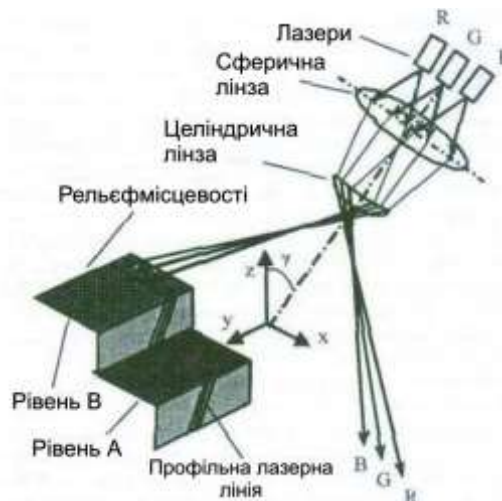


Рис. 2.11. Схема генератора лінії.[11]

Випромінювання лазерних діодів має доволі велику розбіжність. Паралельність лазерних пучків здійснюється короткофокусною сферичною лінзою, після чого три пучки надходять на циліндричну лінзу. Циліндрична лінза розвертає кожний з рівнобіжних пучків таким чином, щоб утворити три плоских пучки, що лежать в одній площині (на рис. 2.11 для наочності плоскі пучки показані незбіжними). Таким чином, формується триколірний плоский пучок лазерного випромінювання, який падаючи на нерівну поверхню (під кутом γ до вертикалі), малює на поверхні профільну лазерну лінію.

Зчитування профільної лазерної лінії здійснюється мініатюрною цифровою відеокамерою, яка використовується для вбудовування в мобільні телефони чи кишенькові комп'ютери.

Для зчитування лінії вісь об'єктива камери повинна бути спрямована під кутом $\delta > \gamma$. Іншими словами, центр об'єктива повинний бути розташований нижче центра циліндричної лінзи на 50 - 100 мм, щоб забезпечити в зображенні, формованому в площині матричного фотоприймача, достатню амплітуду коливань профільної лінії (при спостереженні профільної лінії з

точки, що лежить у площині плоского лазерного пучка, профільна лінія вироджується в пряму і вся інформацію про рельєф місцевості зникає).

3. РОЗРАХУНКОВА ЧАСТИНА

3.1. Розрахунок відношення «сигнал/шум»

В даній роботі приведені результати розрахунку відношення „сигнал/шум” на виході елемента матричного фотоприймача згідно позначень оптичної схеми (рис.1).

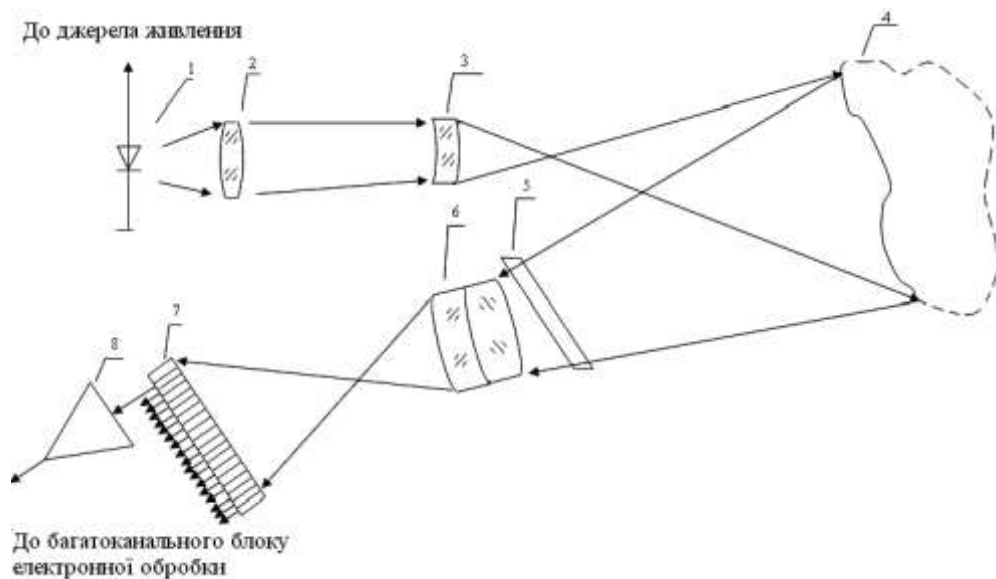


Рис. 3.1. Оптична схема.

1 – лазерний діод, 2 – лінза сферична (збиральна), 3 – лінза циліндрична, 4 – об’єкт, 5 – фільтр інтерференційний, 6 – телеоб’єктив, 7 – фотоприймач матричний, 8 – підсилювач операційний

Нехай довжина хвилі випромінювання лазерного діода дорівнює λ , а його потужність – P . Знайдемо, яка частина цієї потужності повертається на елемент матричного фотоприймача.

Для розрахунку цього відношення підставимо такі числові дані:

$P = 500 \text{ мВт}; \lambda = 650 \text{ нм}; n_2 = n_3 = 1,5; d_3 = 2 \text{ мм}; D_3 = 10 \text{ мм}; L = 100 \text{ м};$
 $l_0 = 10 \text{ м}; m = 100; R_e = 0,3; \theta_e = 45^\circ; D_{ob} = 70 \text{ мм}; T_{ob} = 0,9; T_f = 0,5;$
 $\Delta\lambda_f = 0,1 \text{ нм}; \Delta\lambda_{ph} = 400 \text{ нм}; R_{ph} = 0,05; E_N = 0,1 \text{ ВТ/м}^2; S_\lambda = 0,6 \text{ А/ВТ};$
 $I_d = 0,01 \text{ нА}.$

Якщо для формування лазерної лінії використовуються сферична та циліндрична лінзи, виготовлені з оптичного скла з показниками заломлення відповідно n_2 та n_3 , то оптичні втрати на відбиття зумовлюють відповідні коефіцієнти пропускання цих елементів:

$$T_2 = T_{2a} T_{2b} = \frac{4}{(n_2 + 1)^2} \frac{4n_2^2}{(n_2 + 1)^2} = \frac{16n_2^2}{(n_2 + 1)^4} = 0,9, \quad (3.1)$$

$$T_3 = T_{3a} T_{3b} = \frac{4}{(n_3 + 1)^2} \frac{4n_3^2}{(n_3 + 1)^2} = \frac{16n_3^2}{(n_3 + 1)^4} = 0,9, \quad (3.2)$$

де індексами „a” та „b” позначені коефіцієнти пропускання вхідної та вихідної поверхонь оптичного елемента. Апертурними втратами в генераторі лазерної лінії знехтуємо.

Припустімо, що лазерна лінія не обривається на краях об’єкта, а повністю відображається на його поверхні. При нормальному падінні випромінювання на об’єкт товщина лазерної лінії визначається дифракційною розбіжністю випромінювання на циліндричній лінзі і становить

$$t_o = d_3 + 1,22 \frac{\lambda L}{D_3} = 0,00993 \text{ м}, \quad (3.3)$$

де d_3 – діаметр лазерного пучка на виході циліндричної лінзи; L – середня відстань від циліндричної лінзи до об’єкта; D_3 – ширина циліндричної лінзи (у площині, перпендикулярній циліндричній поверхні). Довжина лазерної лінії на об’єкті l_0 визначається взаємним розташуванням фокусів сферичної (збиральної) лінзи та циліндричної лінзи.

Зробімо таке припущення. Вважаймо, що зображення лазерної лінії на об'єкті повністю відображається телеоб'єктивом на всій ширині матричного фотоприймача (на m елементах матриці $m \times n$). Тоді лазерну лінію на об'єкті можна розглядати як складену з m елементів, кожен з яких має площу

$$A_e = t_0 l_0 / m = 993 \text{ мкм}^2. \quad (3.4)$$

На цей елемент припадає частина потужності випромінювання лазерного діода, яка становить

$$P_e = \frac{T_2 T_3}{m} P = 42,5 \text{ мВт}. \quad (3.5)$$

Якщо об'єкт має матову поверхню, то з деяким наближенням освітлений лазером елемент поверхні можна розглядати як вторинний ламбертів випромінювач, для якого у різних напрямках яскравість лазерної лінії на об'єкті буде однаковою. Яскравість елемента лазерної лінії на об'єкті з матовою поверхнею описується формулою

$$B_e = \frac{R_e P_e \cos \theta_e}{\pi A_e} = 288,9 \text{ мВт/м}^2, \quad (3.6)$$

де R_e – коефіцієнт відбиття елемента поверхні; θ_e – кут падіння лазерного випромінювання на поверхню об'єкта.

Потік випромінювання, який спрямовується з елемента поверхні об'єкта у вхідну апертуру телеоб'єктива фотоприймальної частини пристрою, дорівнює

$$P_{ob} = B_e A_e \Omega_{ob}, \quad (3.7)$$

де Ω_{ob} – тілесний кут, обмежений конусом променів, які йдуть від центра елемента поверхні на край вхідного отвору телеоб'єктива (при цьому елемент

поверхні розглядається як вторинне точкове джерело світла). Зазначений тілесний кут може бути знайдений із відношення

$$\frac{\Omega_{ob}}{4\pi} = \frac{\pi D_{ob}^2 / 4}{4\pi L^2}, \quad (3.8)$$

де D_{ob} – діаметр вхідної апертури телеоб’єктива. Об’єднуючи чотири останні формули, знайдемо потік випромінювання, який потрапляє в телеоб’єктив від одного елемента лазерної лінії на поверхні об’єкта:

$$P_{ob} = \frac{T_2 T_3 R_e D_{ob}^2 P \cos \theta_e}{4mL^2} = 0,110339 \text{ нВт}. \quad (3.9)$$

Якщо T_{ob} – коефіцієнт пропускання телеоб’єктива (складеного з декількох лінз з різними показниками заломлення), а R_{ph} – коефіцієнт відбиття просвітлювального покриття фотоприймача, то в елементарний напівпровідниковий фотоприймач (фотодіод) входить сигнальний потік випромінювання

$$P_s = \frac{T_2 T_3 T_{ob} T_f R_e (1 - R_{ph}) D_{ob}^2 P \cos \theta_e}{4mL^2} = 0,04717 \text{ нВт}, \quad (3.10)$$

де T_f – коефіцієнт пропускання інтерференційного фільтра, встановленого перед матричним фотоприймачем.

Якщо поверхня об’єкта опромінюється також некогерентним (фоновим) випромінюванням, яке створює на поверхні шумову освітленість E_N , то у фотоприймач увійде також шумовий потік випромінювання

$$P_N = \frac{R_e A_e E_N D_{ob}^2 \Delta\lambda_f}{4L^2 \Delta\lambda_{ph}} = 0,000000875 \text{ нВт}, \quad (3.11)$$

де $\Delta\lambda_f$ – ширина смуги пропускання інтерференційного фільтра; $\Delta\lambda_{ph}$ – ширина характеристики спектральної чутливості фотодіода.

Якщо S_λ – спектральна чутливість фотодіода, то величина сигнального фотоструму становить

$$I_S = S_\lambda P_S = 0,0283302 \text{ нА}, \quad (3.12)$$

а сума фонового фотоструму разом з темновим струмом I_d складає шумовий струм

$$I_N = S_\lambda P_N + I_d = 0,6 \text{ АВт} * 0,000000875 * 10^{-9} \text{ Вт} + 0,013 \text{ нА} = 0,013 \text{ нА}. \quad (3.13)$$

Відношення „сигнал/шум” на виході елемента матричного фотоприймача складає

$$S/N = \frac{I_S^2}{I_N^2} = \frac{0,0008026}{0,00169} = 4,75 \approx 5. \quad (3.14)$$

Для вищенаведених даних відношення „сигнал/шум” складає $S/N = 5$.

Рівень шуму оптичної системи є дуже важливим параметром, оскільки він визначає величину відношення сигнал/шум, від якого залежить якість зображення при візуальному сприйнятті і можливість автоматичного вимірювання параметрів дефектів.

3.2 Розрахунок відстані до об'єктів і виділення лазерної лінії

За допомогою мови програмування проведемо розрахунок відстані до об'єкта і завдяки програмі MatLab виділимо лазерну лінію з цифрового фото .

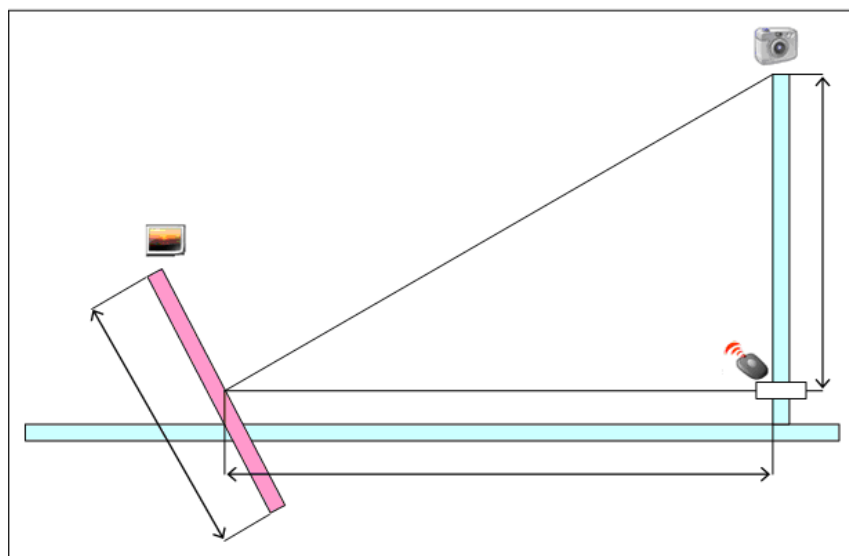


Рис. 3.2. Схема отримання цифрового фото з лазерною лінією.



Рис. 3.3. Отримане цифрове фото.

1. Завантажуємо зображення з файлу, і представляємо його у вигляді двомірного масиву.



Рис.3.4. Завантажене зображення

2. Проходимо циклом по зображенню оцінюючи кожен піксел, якщо зелена G, або синя B складова більша, ніж червона R – замінюємо колір пікселя на чорний, якщо ні, залишаємо у пікселя тільки червону складову, а зелену і синю робимо рівною 0.

3. Проглядаємо масив пікселів циклом, і в кожній вертикальній складовій знаходимо піксел з максимальною червоною складовою.



Рис. 6 Масив пікселів проглянений циклом

4. Прибираємо шум – аналізуємо кожен піксель, якщо у нього є піксель зліва і справа, залишаємо, якщо ні, робимо його чорного кольору.

5. Вводимо абстракцію “РІВЕНЬ” – це сукупність пікселів, відстань між украй лівим і украй правим не менше 50 пікселів, і подальший повинен мати різницю по висоті не більше 5 пікселів. Аналізуючи оброблений двовимірний масив (у вигляді якого представлено зображення) – формуємо масив РІВНІВ

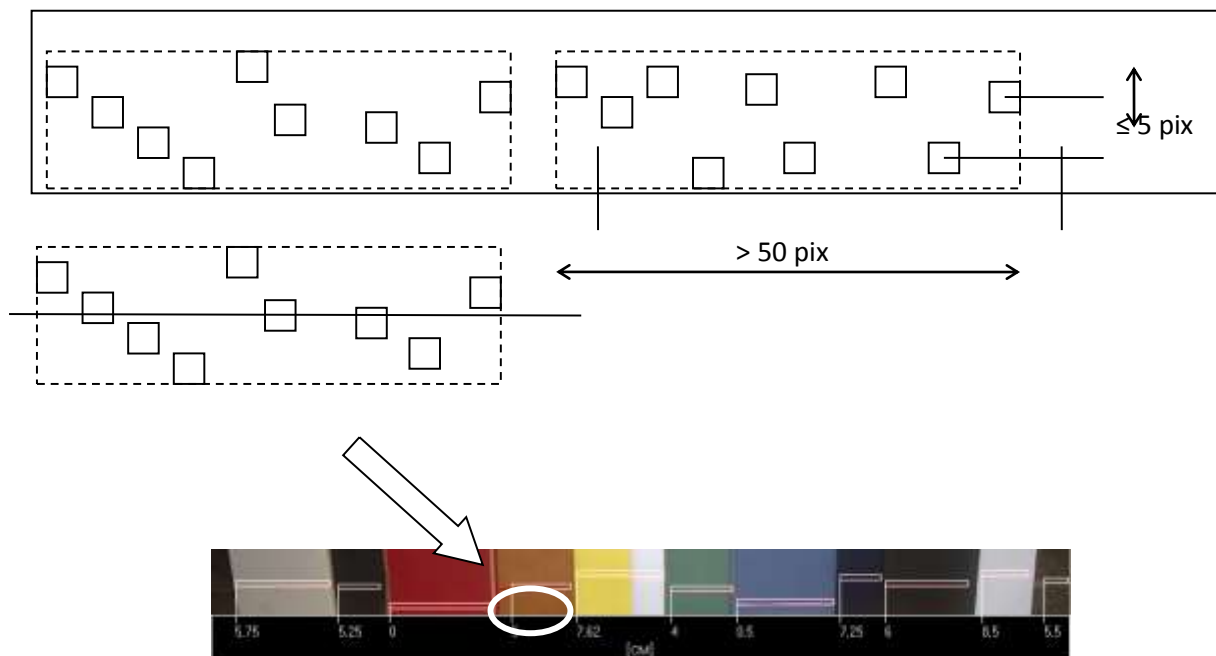


Рис. 3.5. Отримання середнього значення висоти РІВНЯ

6. Використовуючи формули, приведені у нижче – розраховуємо відстань до об'єктів.

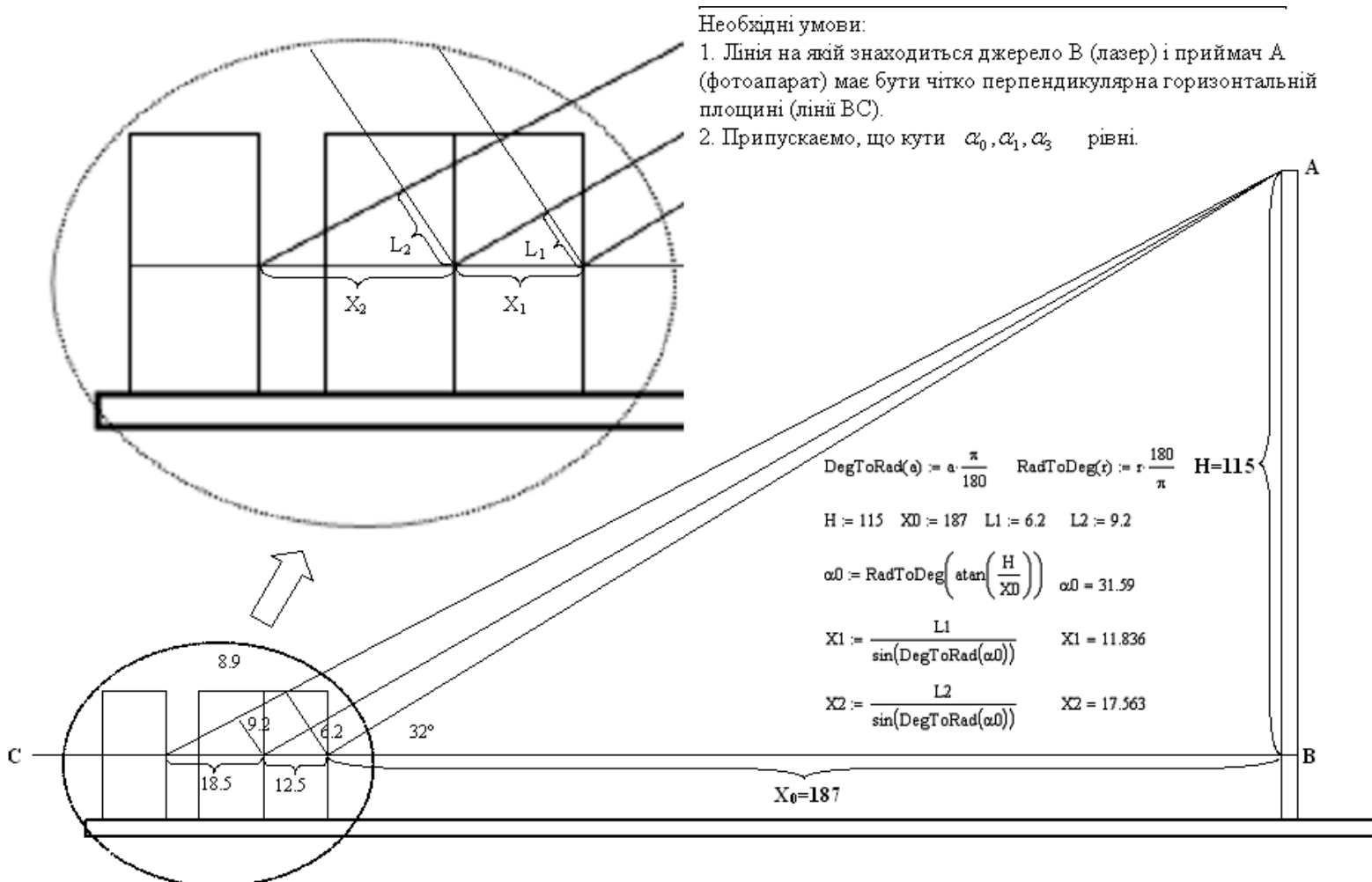


Рис. 3.6. Геометрія для розрахунку об'єктів

7. Після запуску програми в середовищі MatLab відкриваємо цифрове зображення (вибираємо 3 рівні: Червоний, Зелений, Синій).



Рис.3.7 Відкрите зображення

Після відкриття програмою зображення відбувається виділення окремого кольору і збереження результату в окремий файл (out.jpg).



Рис. 3.8. Виділення окремого кольору

Зберігаємо всі змінні і результати для подальшого оброблення в середовищі MatLab і задаємо ім'я вихідного файлу.

Проводимо 3-х вимірне моделювання системи визначення рельєфу поверхні (в залежності від висоти поверхня зафарбовується в різний колір).

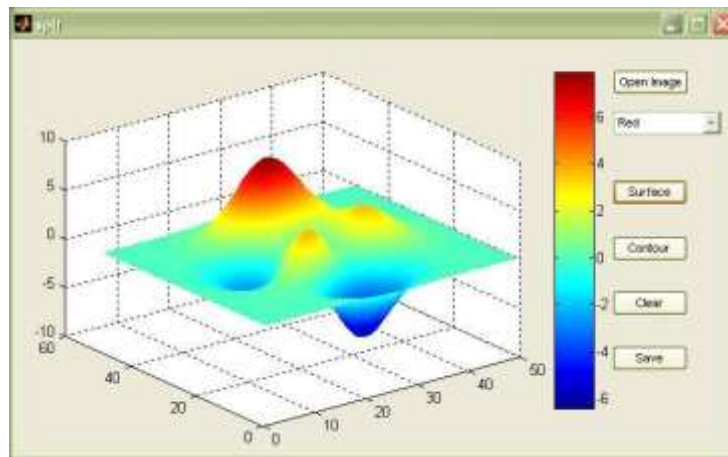


Рис.3.9. Визначення рельєфу поверхні з допомогою моделювання

Деякою функцією програми в середовищі MatLab моделюємо двовимірну систему 3-х вимірному моделювання системи визначення рельєфу поверхні (зміна висоти позначається кольором контуру, а також значеннями у визначених точках).

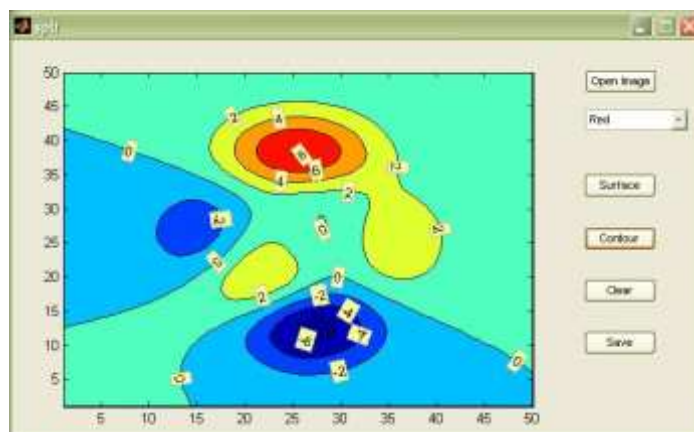


Рис.3.10 Двовимірне моделювання системи визначення рельєфу поверхні

Дослідження алгоритмів виділення лазерної лінії з цифрового фото підтвердили доцільність їх роботи. Їх застосування дозволяє найбільш

швидко і точно візуально оцінити спостерігачеві глибину сцени досліджуваного рельєфу і відстань між максимумами перепадів.

4. ПРОПОЗИЦІЇ ДО СТАРТАП-ПРОЕКТУ

Оптоелектронний датчик надає можливість системи технічного зору, а це в свою чергу є спеціальним сенсорним пристрій, за допомогою якого можна забезпечити отримання якісних зображень, їх подальшу обробку і перетворення.

Робота даного пристрою базується на використанні комп'ютерного зору. Машинне зір неможливо порівняти з людським. Воно здійснюється за допомогою вивчення компонентів зображення, проведення швидкого і якісного аналізу, а також порівняння отриманих відомостей з раніше закладеними в базі.

Актуальні переваги системи технічного зору(СТЗ):

- Прекрасні робочі характеристики. СТЗ відрізняється високою швидкістю роботи, продуктивністю, максимальною точністю вимірювань, з імовірністю невеликою кількістю помилок;
- Багатофункціональність. Для вирішення широкого спектра завдань виробництва і науки використовуються спеціалізовані системи.

Актуальне застосування:

- промислове виробництво;

- контроль стану об'єктів;
- різні області науки;
- медицина(антропологія, протезування, ортопедія та інше);
- гіодезія;
- авіа-, авто-, кораблебудування;
- у пристроях з тактильним відображенням для сліпої людини.
- для війських потреб.

Датчик рельєфу може застосовуватися у концепції створення пристрою який перетворює візуальну інформацію в тактильні образи, доступні для сприйняття сліпії людини. Концепція перетворення простих візуальних образів в тактильні образи. Візуальним образом може бути профільна лінія, утворена на місцевості плоским лазерним пучком, далі відобразити цю інформацію у вигляді тактильного образу, який здатний повідомити сліпому не тільки про нерівності під ногами, але і про її відбивної здатності, зокрема про колір. Наявність додаткової інформації дозволяє уникнути небезпечних або забруднених ділянок дороги і відкриває шлях до розпізнавання найпростіших образів, таких, наприклад, як калюжа, газон, квіти, пішохідна "зебра", загублений листок паперу (документ, купюра) і т.д.

ВИСНОВКИ

В даній роботі був одержаний розрахунок відношення «сигнал/шум» на виході елемента матричного фотоприймача $SN = 5$ показує, що ймовірність помилок мала.

Окрім цього, в роботі був розглянутий один із методів безконтактного лазерного сканування для отримання тривимірної моделі предметів. По – перше цей метод дозволяє швидко і якісно, в порівнянні з контактними методами сканування, без механічного контакту приладу з об’єктом, отримувати просторову математичну модель для подальшого використання, що залежить від типу задачі. По–друге чутливість даних пристроїв легко збільшується за рахунок використання фотооб’єктивів з більшою фокусною відстанню.

Також, було вирішено завдання перетворення імпульсних викривлень лінії в колір. Сама лінія багато раз покриває об’єкт у вигляді растру, спотворення якого є інформативними і величина цього растру перетворить в колір, який ми можемо спостерігати на екрані монітора і це дозволяє відразу приблизно оцінити глибину сцени або величину рельєфу.

Розробка програми, може знайти широке застосування в будь-якій області науки і техніки, де необхідна швидка візуальна оцінка глибини сцени досліджуваного об'єкту (наприклад, аналіз рельєфу пілотом перед посадкою). Використання безконтактних лазерних пристроїв забезпечує більш ефективне та економічне вирішення ряду задач в різних галузях в порівнянні з традиційними методами.

В цілому слід відмітити, що розглянута область приладобудування в нашій державі розвинута явно недостатньо. Враховуючи, з однієї сторони, наукову ємність приладів для вимірювання форм об'єктів (особливо в частині програмного забезпечення і взаємодії лазерного випромінювання з поверхністю), а, з другої, – їх явну і все збільшуючу потребу в промисловості, представляється доцільним зосередити в цьому напрямку зусилля спеціалістів для створення оригінального, конкурентноспроможного на світовому ринку продукту.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. <https://cyberleninka.ru/article/v/triangulyatsionnyy-lazernyy-dalnomer>
2. <http://znaimo.com.ua/Далекомір>
3. https://studopedia.su/16_165502_osnovni-metodi-vimiryuvannya-viddaley.html
4. Коломийцов Ю.В. Интерферометры. Основы инженерной теории, 1976.-154 с.
5. Чадюк В.О. Оптоелектроніка від макро до нано. Передавання, перетворення та приймання оптичного випромінювання, 2018.-76 с.
6. Дураев В.П., Неделін Е.Т. Полупроводниковые лазеры с волоконной брэгговской решеткой и узким спектром генерации.- Квантовая Электроника, 31, №6, с. 529-530, 2001.
7. Nanoscopy and multidimensional optical fluorescence microscopy / Edited by A. Diaspro. – Boca Raton, London, New York: CRC Press, 2010. – 424 p.
8. Байбородин Ю.В. Введение в лазерную технику. – К.: Техника, 1977.-255с.
9. Основы лазерной техники. Байбородин Ю.В.,- Киев: Вища школа. Гловное изд-во, 1981.-380с.
- 10.Рябцев Н.Г. Материалы квантовой электроники. ”Советское радио”, 1972.-344с.
- 11.Ряхин А., Цифрові фотокамери: зимовий парад // Мир ПК, 1998 № 2, 170-177с.

12. Burns H.N., Yun S.T. Compact, multichannel receiver using InGaAs APDs for single pulse eye-safe, laser radar imagery//Proc. SPIE.1997.V.3065.P.22-29.
13. Дьяконов В.П., Абраменкова И.В. Matlab 5.0/5.3. Система символьной математики. М.: "Нолидж". 1999. 633 с.
14. Потемкин В.Г. MATLAB 5 для студентов. Диалог-МИФИ. 1999. 447 с.
15. Егоренков Д.Л., Фрадков А.Л., Харламов В.Ю. Основы математического моделирования с примерами на языке МАТЛАБ. Учеб. Пособие под ред. проф. Фрадкова А.Л. СПб: БГТУ. 1994. 190 с.
16. http://studopedia.su/16_165502_osnovni-metodi-vimiryuvannya-viddaley.html
17. <http://referatu.in.ua/konspekt-lekcij-dlya-studentiv-spec...zemlevp.html?page=39>